

Школа ИЯТШ

Направление подготовки 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

Отделение школы (НОЦ) ЯТЦ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Естественная конвекция газообразного UF ₆ в вертикальной цилиндрической емкости

УДК 661.87.04:536.25:518.87

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Д	Куркин Петр Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	Д.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселева Е.С.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Т.С.	к.ф-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (компетенции)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Общекультурные компетенции		
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.	Требования ФГОС (УК3,4,5, ОПК-2).
P2	Способность логически, верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.	Требования ФГОС (УК-2-5, ОПК-2).
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления, осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности	Требования ФГОС (Ук1, УК- 2, УК-3, УК-4, ОПК-2, 3, ПК- 6, 19-23).
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы.	Требования ФГОС (ОК-4, ОПК-1-3, ПК-1, ПК-5, Пк-7, Пк-8, Пк-9, ПК-10, ПК-11, ПК-17, Пк-19,Пк-20,ПК-21).
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.	Требования ФГОС (УК-4,5, ОПК-2, ПК-6)
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (УК-7, 8, ОПК-3, ПК-12).
Общепрофессиональные		
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.	Требования ФГОС (УК-1, 2, ОПК-1, ПК-2,3,4,5, 6,7, 10, 11,14,).
Профессиональные компетенции		
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного	Требования ФГОС (УК-7, 8, ОПК-3, ПК-2, 4,6, 8, 11, 12, 14, 17, 18, 20).

	общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).	
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов	Требования ФГОС (УК-1,2,8, ПК-2, 5,6, 7, 8, 9, 10, 11, 20).
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.	Требования ФГОС (ПК-4, 14, 15, 16, 21, 22).
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 20, 21, 22).
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.	Требования ФГОС (УК-2 ОПК-1, ПК-1, 2, 4, 5, 6, 7, 8).
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.	Требования ФГОС (ОПК-1,2, ПК – 1, 5, 10, 11, 13, 20, 21).
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.	Требования ФГОС (ПК-3, 8, 7, 10, 11, 14, 16, 18, 22).
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования	Требования ФГОС (УК-1, 2, 3, 6, 8, ОПК-3 ПК-5, 6,9, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23).

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа ИЯТШ

Направление подготовки 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

Отделение школы (НОЦ) ЯТЦ

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

П.Н. Бычков

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А6Д	Куркину Петру Александровичу

Тема работы:

Естественная конвекция газообразного UF_6 в вертикальной цилиндрической емкости

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 59-84/С от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

25.05.2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

Задание. Литературные источники по основам процесса десублимации UF_6 и подходам к его математическому моделированию, физико-химическим свойствам UF_6 и HF , особенностям процесса десублимации на разделительных предприятиях.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Обзор литературы. 2. Верификация разработанной двумерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF_6 на задаче естественно-конвективного течения газообразного UF_6 в вертикальной цилиндрической емкости при наличии источника тепловыделения на ее нижней торцевой стенке. 3. Экономический расчет. 4. Охрана труда и техника безопасности. 5. Выводы. Заключение.
Перечень графического материала	1. Диаграмма состояния UF_6 . 2. Схема расчетной области. 3. Схема контрольного объема. 4. Вектора скорости и изотермы газообразного UF_6 в различные моменты времени. 5. Профили температуры в поперечном сечении емкости. 6. Профили вертикальной компоненты скорости. 7. Зависимость среднего числа Нуссельта от температуры нагрева.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Описание объекта исследований	Профессор ОЯТЦ ИЯТШ, д.т.н. Орлов А.А.
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП, к.э.н. Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ, к.ф.-м.н. Гоголева Т.С.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	17.01.2020 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Орлов А.А.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Д	Куркин Петр Александрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А6Д	Куркину Петру Александровичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость на проект. Оклад руководителя и инженера в соответствии с внутренними нормами ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Срок окупаемости; премии; надбавки; дополнительная заработная плата; накладные расходы; рабочий коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Ставки НДС и социального налога.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка осуществляется на основе анализа конкурентных технических решений, а также SWOT анализа.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Основой для формирования и планирования бюджета является основная заработная плата исполнителей, страховые отчисления и накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение эффективности происходит на основе расчета ресурсного показателя эффективности научного исследования.

Перечень графического материала:

1. Матрица SWOT 2. График проведения и бюджет НИ 3. Диаграмма Ганта 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	17.01.2020 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Киселева Е.С.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Д	Куркин Петр Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6Д	Куркину Петру Александровичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Тема ВКР:

Естественная конвекция газообразного UF₆ в вертикальной цилиндрической емкости	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Проверка на адекватность газодинамической составляющей разработанной двумерной математической модели процесса десублимации UF ₆ . Полученные результаты использованы для верификации двухмерной математической модели, которая может быть использована для расчета параметров десублимации гексафторида урана в вертикальных погружных емкостях без оребрения, с горизонтальным оребрением в АО «ПО ЭХЗ»
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Приказ Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 N 302н (ред. от 13.12.2019) – Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426 – СанПиН 2.2.2. / 2.4. 1340-03 – Типовая инструкция ТОИ Р-45-084-01
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p>К вредным факторам относятся:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отклонение параметров микроклимата; – шум и вибрация; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – электромагнитное излучение; – статические и динамические нагрузки; – нервно-эмоциональные перегрузки. <p>К опасным факторам относятся: электрический ток.</p>
3. Экологическая безопасность:	– анализ воздействия отходов

	производства ПЭВМ на окружающую среду; — переработка и утилизация отработанной компьютерной техники.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	— анализ типичной ЧС - возникновение пожара на рабочем месте; — превентивные меры и порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	17.01.2020 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Т.С.	к.ф-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6Д	Куркин Петр Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 96 страниц, 35 рис., 12 табл., 34 источника.

Ключевые слова: гексафторид урана, хладагент, десублимация, парогазовая смесь, тепло— и массоперенос, математическая модель, нестационарный процесс.

Объектом исследования является вертикальная погружная емкость без оребрения.

Цель работы – проверка на адекватность газодинамической составляющей разработанной математической модели процесса десублимации UF₆ на задаче естественно-конвективного течения газообразного UF₆ в вертикальной цилиндрической емкости при наличие источника тепловыделения на ее нижней торцевой стенке.

В процессе исследования проводились: верификация разработанной двумерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF₆ на задаче естественно-конвективного течения газообразного UF₆ в вертикальной цилиндрической емкости при наличии источника тепловыделения на ее нижней торцевой стенке.

В результате исследования: подтверждена адекватность математической модели, описывающей свободно-конвективное течение газообразного гексафторида урана, происходящее при его десублимации в вертикальной цилиндрической емкости без оребрения.

Основные конструкционные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: область решения для математической модели представляет собой емкость, изготовленную из стали марки 16ГС, высота емкости составляет 2 м, радиус – 0,5 м, толщина стенки – $2,0 \cdot 10^{-2}$ м. Источник тепловыделения расположен на нижней торцевой стенке.

Область применения: полученные результаты использованы для верификации двухмерной математической модели, которая может быть использована для расчета параметров десублимации гексафторида урана в вертикальных погружных емкостях без оребрения, с горизонтальным оребрением в АО «ПО ЭХЗ».

Экономическая значимость работы: коэффициент эффективности научного исследования равен 10,4 из 14, работа выполнена на высоком уровне.

В будущем планируется создать математическую модель расчета коллектора для десублимации UF₆ в вертикальные емкости, а также математическую модель данного процесса в горизонтальных емкостях, провести исследования и оптимизировать этот технологический процесс на разделительных предприятиях отрасли.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Гексафторид урана (UF_6) – химическое соединение урана со фтором, используемое в газообразном состоянии в качестве исходного сырья для разделения изотопов урана.

Сублимация (возгонка) – физический процесс перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу, в довольно широком диапазоне давлений.

Десублимация (конденсация) – физический процесс перехода вещества из газообразного состояния в твердое (кристаллическое), который требует небольшого отвода тепла при соответственном поддержании температуры и давления.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	15
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	17
1 Математическое моделирование процесса десублимации UF ₆	17
1.1 Области применения десублимации	17
1.2 Десублимация UF ₆ на разделительных предприятиях	19
1.3 Физико-химические свойства гексафторида урана и фтористого водорода	22
1.4 Использование математического моделирования для исследования процесса десублимации UF ₆	26
1.4.1 Целесообразность использования математических моделей для исследования процессов.....	26
1.4.2 Подходы к созданию математических моделей	27
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	29
2 Математическая модель нестационарного процесса десублимации UF ₆ в вертикальной погружной емкости	29
2.1 Объект исследования.....	29
2.2 Двумерная математическая модель нестационарного процесса десублимации UF ₆	29
2.2.1 Постановка задачи	30
2.2.2 Метод решения.....	37
2.3 Проверка на адекватность газодинамической составляющей разработанной модели.....	47
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	53
3.1 Техничко–экономическое обоснование ВКР	53
3.1.1 SWOT – анализ.....	54
3.2 Планирование НИР.....	56

3.2.1 Планирование этапов и работ по выполнению НИР	57
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР	58
3.2.3 Разработка календарного плана работ	59
3.3 Определение плановой себестоимости проведения НИР	64
3.3.1 Состав затрат, включаемых в себестоимость НИР	64
3.3.2 Формирование и расчёт затрат, включаемых в себестоимость.....	65
3.3.2.1 Материальные затраты	65
3.3.2.2 Затраты на оплату труда работников	66
3.3.2.3 Отчисления в государственные страховые фонды.....	68
3.3.2.4 Прочие прямые расходы	68
3.3.2.5 Накладные расходы	69
3.4 Эффективность НИР.....	70
4 Охрана труда и техника безопасности.....	75
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	76
4.2 Производственная безопасность	79
4.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов.....	79
4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия опасных и вредных факторов	80
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	87
ВЫВОДЫ	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	93

Введение

Процесс десублимации является неотъемлемой частью ядерно-топливного цикла. На разделительных предприятиях газообразный гексафторид урана, использующийся как рабочее вещество, десублимируют на отборных концах разделительного каскада. Емкости с обогащенным гексафторидом урана отправляются на предприятия для перевода UF_6 в UO_2 и изготовления ТВЭЛов [1], а емкости с обедненным – на склад для длительного хранения.

Потребность в оптимизации и увеличении мощности процесса десублимации возникает при замене газовых центрифуг на более производительные, что влечет за собой большую нагрузку на конденсационно-испарительные установки.

Экспериментальный метод решения такой задачи представляется дорогим и времязатратным, что делает подход к разработке математических моделей тепло- и массообмена, протекающих при десублимации гексафторида урана более предпочтительным.

В настоящее время на предприятиях по обогащению урана для десублимации UF_6 в основном используются вертикальные погружные емкости, с гладкой внутренней поверхностью или внутренним оребрением, которые просты, удобны и экономичны в эксплуатации [1]. Для исследования процесса десублимации UF_6 в вертикальные погружные емкости нами разработана двумерная нестационарная математическая модель [2], которая в отличие от известных математических моделей [3–6] не использует эмпирические данные, учитывает десублимацию UF_6 на торцевых стенках емкости, эллиптичность этих стенок, нестационарность процессов тепло- и массообмена, а также движение газообразного UF_6 внутри емкости.

Движение газообразного UF_6 внутри охлаждаемых емкостей возникает в результате гравитационной конвекции и является определяющим механизмом формирования рабочего режима переноса массы, импульса и энергии [7].

Целью данной работы являлась проверка на адекватность

газодинамической составляющей разработанной математической модели процесса десублимации UF_6 на задаче естественно-конвективного течения газообразного UF_6 в вертикальной цилиндрической емкости при наличие источника тепловыделения на ее нижней торцевой стенке.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1 Математическое моделирование процесса десублимации UF₆

1.1 Области применения десублимации

Процессы сублимации и десублимации веществ достаточно широко используются в различных отраслях народного хозяйства.

Сублимация представляет собой переход вещества из твердого агрегатного состояния в газообразное, минуя жидкую фазу. Процесс обратный сублимации (десублимация) – это переход вещества из газообразного состояния в твердое кристаллическое.

Десублимация является достаточно сложным процессом, включающим стадию переноса газообразного вещества к поверхности теплообмена, рост слоя твердой фазы на этой поверхности, перенос тепла от газовой фазы к хладагенту через слой образовавшегося десублимата и стенку емкости.

Процесс массообмена при десублимации вещества является нестационарным и определяется разностью температуры газовой фазы и равновесной температуры фазового перехода, соответствующей температуре поверхности фазового перехода. Увеличение толщины слоя десублимата со временем приводит к увеличению его термического сопротивления, за счет чего уменьшаются температура поверхности фазового перехода и интенсивность протекания данного процесса [1]. При этом перенос газообразного вещества к поверхности теплообмена осуществляется за счет диффузии, стефановского потока, естественной конвекции и термодиффузии.

Десублимация используется в ряде химических производств (например, при получении йода, фталевого ангидрида, малеинового ангидрида, антрахинона, фталонитрила, хлорида алюминия [2] и т. д.), а также в металлургии (например, при производстве циркония [3–6], гафния [5], титана [6], молибдена [7], мышьяка [8] и других металлов) для очистки целевых веществ от примесей. Разделение парогазовой смеси происходит за счет

разности в упругости насыщенных паров веществ и может протекать как на охлаждаемой поверхности, так и в охлаждаемом объеме.

Наряду с различными сорбционными способами десублимация применяется в газоочистных сооружениях на предприятиях, имеющих выбросы вредных веществ в атмосферу [9, 10]. Жесткие требования, предъявляемые к растворителям при абсорбции и дальнейшие сложности, связанные с извлечением вещества из адсорбентов, делают процесс десублимации более перспективным и технологически легче реализуемым.

Процессы сублимации и десублимации совместно используются в пищевой промышленности для обезвоживания продуктов и увеличения их срока годности [1, 12]; в медицине для консервирования донорской крови, кровезаменителей, сывороток, вирусов и гормональных препаратов; в биологии для хранения и культивирования микробных культур и для сушки биологических препаратов ветеринарного назначения; в фармацевтике при производстве сухих легкорастворимых антибиотиков, вирусных препаратов и БАДов.

Кроме того, процессы сублимации и десублимации активно используются в ядерно-топливном цикле [13].

На атомных станциях для получения электроэнергии в настоящее время используется уран, обогащенный по изотопу ^{235}U . При обогащении по легкой компоненте используется газообразный гексафторид урана. В качестве рабочего вещества. UF_6 получают в плазменных реакторах методом фторирования на сублиматных производствах. При десублимации гексафторид урана очищается от примесей (избыток фтора, фторид водорода и т.д.) и отправляют в специальных емкостях в твердом виде на разделительные производства. На производстве емкости подключаются к коллектору питания и, с помощью воздушного обогрева или индукторов, емкости нагреваются. Гексафторид урана сублимируется и подается на очистку от легких примесей в газообразном виде, а после идет на питание разделительного каскада. На выходе получают два потока – отбор (обогащенный по ^{235}U) и отвал

(обедненный). Отвал проходит процесс десублимации и отправляется на склад для хранения в твердом виде в специальных емкостях. Отбор же проходит очистку от легких и тяжелых примесей и в твердом виде отправляется на предприятия для перевода UF_6 в UO_2 и изготовления из него ТВЭЛов [13, 14].

1.2 Десублимация UF_6 на разделительных предприятиях

На разделительных производствах процесс десублимации имеет свою специфику в сравнении с тем же процессом на сублиматных производствах. Во-первых, газообразный гексафторид урана на выходе разделительного каскада обладает более низкой температурой (20-30 °C). Во-вторых, UF_6 на разделительном производстве содержит в своем составе легкие примеси, которые имеются у исходного сырья или, ввиду неполной герметичности, поступили в оборудование из атмосферного воздуха. В процессе разделения газоцентрифужным методом данные примеси смещаются в сторону отбора легкой фракции гексафторида урана и служат источником существенных потерь мощности разделения газовых центрифуг. Содержание легких примесей в потоке отвала минимально [24, 25]. Для извлечения легких примесей 2 раза за цикл заполнения емкости коллектора отвала прокачиваются в систему отсоса.

Перед десублимацией на специальных очистительных каскадах поток отбора проходит очистку от легких и тяжёлых примесей [26]. В соответствии с требованиями технических условий общее содержание примесей в потоке отбора не должно превышать $5 \cdot 10^{-3} \% \text{ об.}$ [27, 28].

Данные особенности позволяют осуществлять процесс десублимации гексафторида урана непосредственно в транспортных емкостях, чем значительно упрощают реализацию процесса.

Вследствие закрытия во Франции и США газодиффузионных разделительных предприятий в настоящее время произошло перераспределение позиций стран на рынке обогащенного урана. Теперь основным производителем являются консорциум URENCO и Россия с центробежной

технологией разделения. Далее следуют Япония и Китай. Следует заметить, что Россия не только полностью снабжает обогащенным ураном свой внутренний рынок, но и поставляет значительную долю его на внешний рынок.

В России имеется четыре разделительных предприятия, использующих газоцентрифужную технологию. Распределение суммарной разделительной мощности отрасли по этим разделительным предприятиям [29] представлено в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Мощности разделительных предприятий России

Предприятие	Вклад в суммарную мощность, %
АО «Уральский электрохимический комбинат» (АО «УЭХК»), г. Новоуральск	49
АО «ПО «Электрохимический завод» (АО «ПО ЭХЗ»), г. Зеленогорск	29
АО «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК»), г. Северск	14
АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (АО «АЭХК»), г. Ангарск	8

На двух крупнейших предприятиях АО «УЭХК» и АО «ЭХЗ» десублимацию обогащенного и обедненного UF_6 проводят в вертикальных погружных емкостях без оребрения или с внутренним горизонтальным или вертикальным оребрением (рис. 1.1) [30, 31]. Вертикальные ребра прямоугольной формы применяются в емкостях отвала, горизонтальные – в некоторых отборных емкостях.

Достоинством этого способа является простота устройства, удобство и экономичность его эксплуатации [31–36]. Недостатком десублимации в вертикальные погружные емкости является резкое уменьшение ее производительности по мере заполнения емкости, происходящее вследствие низкого коэффициента теплоотдачи через стенку емкости хладагенту и низкой теплопроводности слоя десублимированного UF_6 . В связи с этим для обеспечения необходимой производительности участков десублимации,

приходится использовать несколько емкостей, соединенных в коллектор и работающих параллельно.

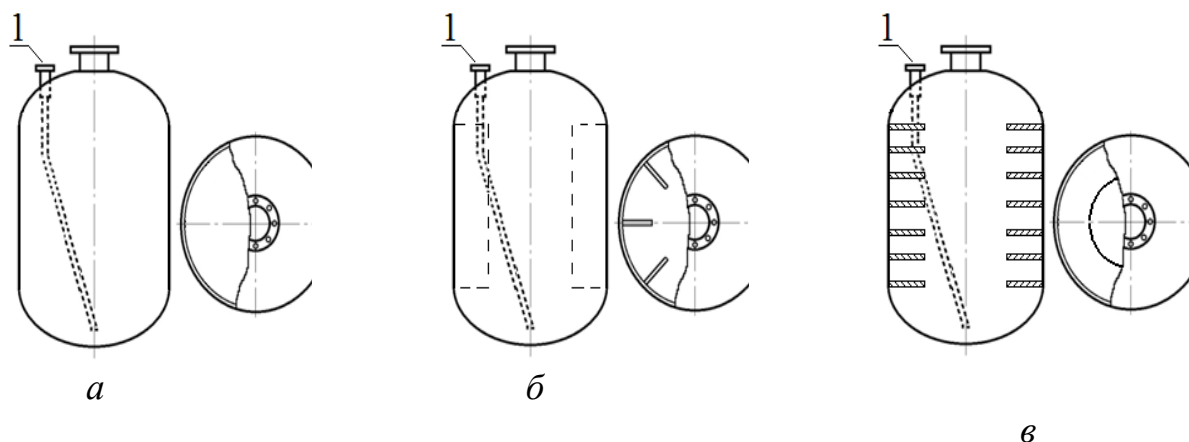


Рис. 1.1. Вертикальная погружная емкость:
а – гладкие внутренние стенки; б – вертикальное оребрение;
в – горизонтальное оребрение (1 – отсосный патрубок)

В АО «СХК» десублимация газообразного потока обогащенной фракции также осуществляется непосредственно в вертикальные погружные емкости, а обедненная по ^{235}U фракция десублимируется с использованием аппаратов комбинированного типа с тепловым сбросом, принцип действия которых рассмотрен в п. 1.1.

В АО «АЭХК» десублимация UF_6 осуществляется в горизонтальные емкости [37] (рис. 1.1). Газообразный UF_6 подается в емкость через патрубок 2.

Внешние стенки емкости орошаются хладагентом (водой). Хладагент (поток I) подается из оросительного устройства 1 в виде тонкой пленки, и, частично испаряясь, стекает по боковой поверхности емкости. Испарение позволяет достичь коэффициента теплоотдачи выше, чем у погружных емкостей [22, 25]. Поддон (3) под емкостью служит для сбора хладагента (поток II).

К недостатку данного метода охлаждения можно отнести неравномерное смачивание внешней поверхности боковых стенок емкостей, при стекании хладагента и отсутствие теплообмена на торцевых поверхностях емкостей [32,33,35–38].

Следовательно, способ десублимации UF_6 в вертикальные погружные емкости без оребрения или с внутренним оребрением прост, удобен и экономичен в эксплуатации.

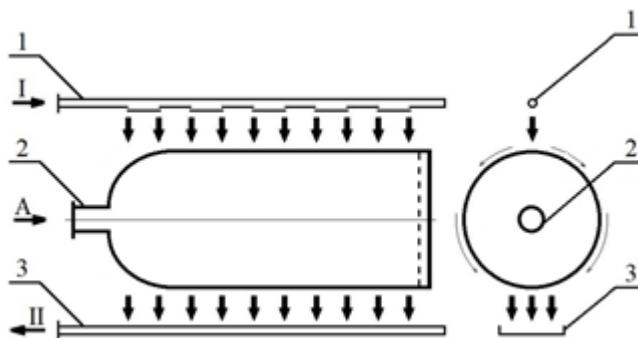


Рис. 1.2. Горизонтальная транспортная емкость

Использование метода десублимации UF_6 в горизонтальных емкостях, охлаждаемых снаружи водой, также представляет интерес в связи с возможностью перехода разделительных предприятий в будущем на работу с тарой зарубежного производства.

1.3 Физико-химические свойства гексафторида урана и фтористого водорода

Гексафторид урана является основным соединением, используемым в промышленных процессах разделения изотопов урана. На разных этапах процесса разделения оно может находиться в разных агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Сублимация (возгонка) UF_6 из твердого состояния в газообразное может происходить при широком диапазоне давлений.

На рисунке 1.3 представлена диаграмма состояния UF_6 .

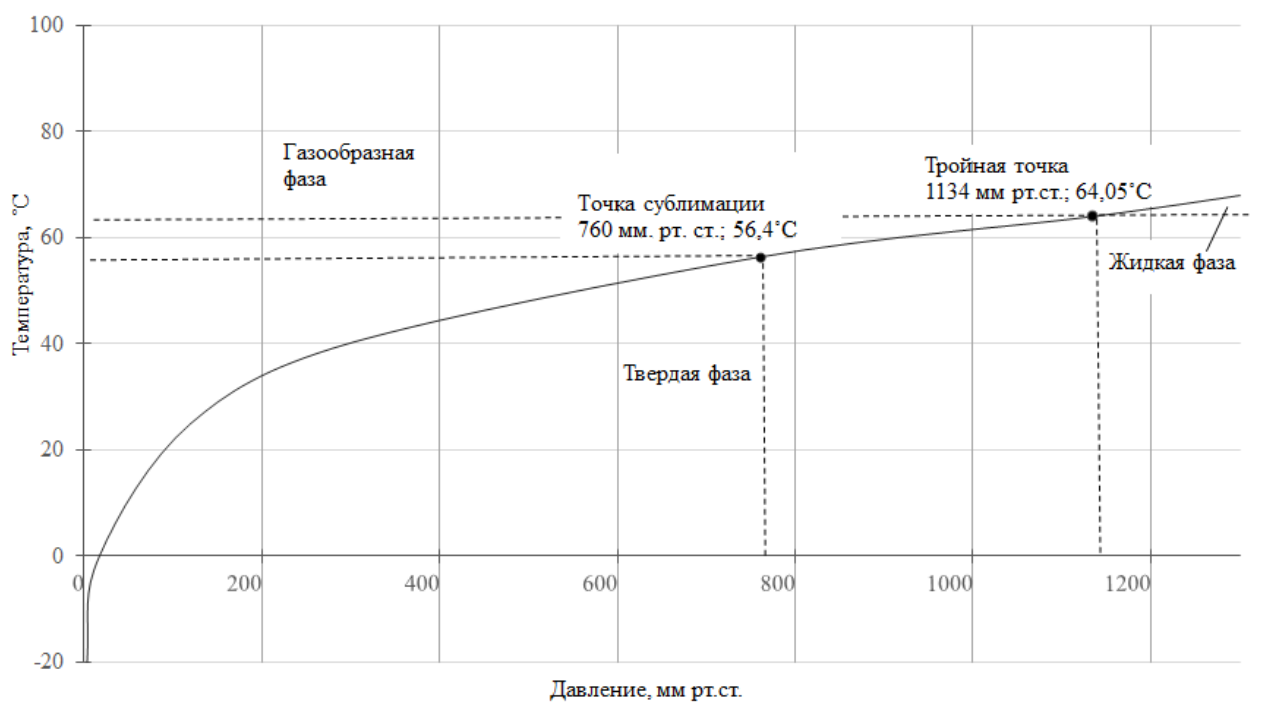


Рисунок 1.3 – Диаграмма состояния UF_6

Десублимация (конденсация) UF_6 – переход из газообразного состояния в твердое, требует отвода тепла при поддержании температуры и давления.

Превращение продукта в твердую фазу из газообразной позволяет сконцентрировать продукт, а скорость данного процесса будет прямо пропорциональна рабочему давлению. Твердая фаза гексафторида урана является самой компактной, так как её переход в жидкую ведет к увеличению объема продукта на одну треть.

Ниже приведены основные физические свойства UF_6 :

Тройная точка	64,05°C и 1.54 атм. (1134 мм рт. ст.)
Температура сублимации (P=760 мм рт. ст.)	56,4°C
Критическое давление	45,5 атм.
Критическая температура	230°C
Теплота:	
– сублимации (63,89°C)	11,43 ккал/моль
– плавления (63,89°C)	4,57 ккал/моль
– испарения (63,89°C)	6,86 ккал/моль

Теплоемкость:

– твердой фазы	40 кал/(моль·град)
– жидкой фазы	46,6 кал/(моль·град)
– газообразной фазы	33 кал/(моль·град)

Плотность:

– твердый (20°C) (конденсированный)	4,67 г/см ³
– жидкий (64°C)	3,66 г/см ³
– жидкий (149°C)	3,07 г/см ³ [31, 32].

Благодаря малому давлению паров гексафторида урана при температуре 50...60°C возможно организовать его безопасное и длительное хранение в твердом состоянии в герметичных емкостях складских помещений. Физические свойства UF₆ дают возможность создать удобную и компактную технологию обращения с ним.

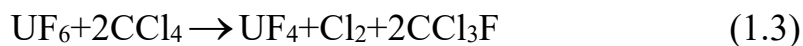
Гексафторид урана весьма химически активен. Из-за своих химических свойств он требует специальных технических решений в подборе материалов и конструкций оборудования. Он мгновенно вступает в реакцию гидролиза с водой и её парами, образуя нелетучее соединение уранилфторид (UO₂F₂) и очень химически активную плавиковую кислоту (HF) [33,34]:



Далее следует реакция самого уранилфторида с водой. Он диссоциирует на UO₂⁺⁺ и F⁻:

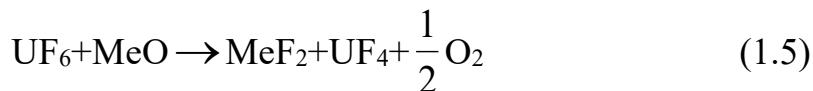


С органическими веществами гексафторид урана взаимодействует, образуя и ряд промежуточных соединений и нелетучий тетрафторид UF₄:



Следовательно, оборудование для работы с гексафторидом урана должно быть обезвожено, герметично, обезжирено и пропассеровано.

При контакте с некоторыми металлами и их оксидами происходят потери (коррозия) UF_6 . Такие потери велики, особенно при контакте железом, цинком, свинцом, кремнием, оловом:



Металлофторидные пленки на рабочих поверхностях ведут к снижению надежности технологического оборудования. Кроме того, газообразный гексафторид урана после реакции с водой, металлами и органическими веществами, потеряв часть фтора, переходит в нелетучий тетрафторид урана в порошкообразной форме и выводится из технологического процесса, осаждаясь на внутренних полостях разделительных машин. Коррозионные потери ведут к уменьшению разделительной способности отдельных машин и предприятия в целом. Материалами, наиболее устойчивыми к взаимодействию UF_6 признаются никель, магний, алюминий, медь и их сплавы. Устойчивость этих металлов объясняется образованием поверхностных пленок фторидов металлов, а у алюминия – окисью алюминия [35, 36].

К устойчивым к гексафториду урана органическим материалам относятся фторидная смазка, тефлон.

Стабильность UF_6 к химическим реакциям сильно зависит от температуры поверхностей, с которыми он контактирует и самой температуры газа.

Фтористый водород является основной примесью в UF_6 . Он поступает вместе с сырьем, а также образуется в технологической цепочке при попадании в оборудование влаги воздуха.

Фтористый водород – бесцветный газ или подвижная жидкость, дымящая на воздухе. Температура кипения составляет $20,543^\circ C$, температура плавления $-83^\circ C$ [47]. Плотность фтористого водорода при температуре $19,4^\circ C$ составляет $0,991 \text{ г/см}^3$, при температуре $-93^\circ C$ составляет $1,653 \text{ г/см}^3$. При

испарении фтористого водорода наблюдается значительное понижение температуры стенок емкостей, возможно появление на них инея.

Фтористый водород является едким веществом, в жидком состоянии быстро разъедает прокладки из резины. Фтористый водород хорошо растворяется в воде, образуя фтористоводородную кислоту, является сильнейшим дегидратирующим веществом.

Фтористый водород реагирует практически со всеми металлами, кроме тех, которые образуют защитные фторидные пленки (алюминий, магний, железо, никель). В отсутствие окислителей фтористый водород не действует на медь, а при наличии кислорода медь интенсивно корродирует. Ряд сплавов инертны к HF. Железо и сталь более устойчивы, чем нержавеющая сталь и свинец. С окисями вольфрама, урана, фосфора и серы HF реагирует с образованием оксифторидов и фторкислот [48].

1.4 Использование математического моделирования для исследования процесса десублимации UF_6

1.4.1 Целесообразность использования математических моделей для исследования процессов

Моделирование – это исследование объектов, процессов и явлений путем построения и изучения их моделей. Для исследования физических процессов пользуются двумя методами: математическое и физическое моделирование.

Физическое моделирование – это экспериментальный метод исследования. При этом физическому объекту ставится в соответствие его материальная копия – физическая модель (увеличенная или уменьшенная), допускающая исследование в лабораторных условиях. Выбор геометрических и режимных параметров (давление, скорость, температура) при создании физической модели процесса или объекта основывается на теории подобия.

Измеренные в процессе эксперимента данные необходимы для решения следующих задач:

- Построение на основе экспериментальных данных адекватных математических и физических моделей рассматриваемого процесса.
- Формирование базы данных для расчетов по имеющейся математической модели процесса.
- Верификация математической модели, а при необходимости ее уточнение.

Экспериментальный подход имеет ряд ограничений, в связи с этим математическое моделирование в физике и инженерной практике нашло широкое применение по следующим причинам:

- Усложнение класса исследуемых задач, для которых необходимо создание дорогостоящих экспериментальных установок или модельных объектов.
- Эксперимент связан с энергетическими и финансовыми затратами на обслуживание экспериментальных установок, особенно при изучении крупногабаритных объектов.
- Эксперимент зачастую позволяет получить лишь ограниченный объем информации из-за технических трудностей (например, размещение большого количества датчиков для измерения пространственных характеристик потока).
- Невозможность проведения физического моделирования в ряде областей исследования (например, проведение детальных измерений в тайфунах и грозовых облаках и т.п. из-за случайности времени и места их появления).

Следовательно, поэтому в данной работе будет описана именно математическая модель процесса десублимации гексафторида урана.

1.4.2 Подходы к созданию математических моделей

Для теоретического описания процесса десублимации существуют два подхода: статистический и феноменологический.

Статистический подход рассматривает поведение отдельных частиц систем, их характеристики в дальнейшем усредняются методами математической статистики. Полученные средние значения физических величин характеризуют состояние системы в целом.

В основе феноменологического подхода не рассматриваются сведения об атомно–молекулярной структуре вещества, он представляет десублимацию совокупностью двух одновременно протекающих процессов – теплопереноса и массопереноса. Термодинамические параметры газообразного гексафторида урана являются движущей силой этих процессов, а именно разность температур и разность парциальных давлений около теплообменной поверхности и внутри объема десублимационного аппарата [47–49].

Известны модели, использующие феноменологический метод моделирования процесса десублимации UF_6 , однако все они имеют общие недостатки:

1. Отсутствие учета теплопереноса путем конвекции и трения газообразного UF_6 о слой десублимата во время его движения вдоль теплообменных стенок (при десублимации в емкости или десублиматоре газообразный UF_6 считают неподвижным).

2. Отсутствие учета десублимации на торцевых стенках теплообменных емкостей.

3. Отсутствие учета нестационарности процессов тепло– и массопереноса.

В ОЯТЦ ТПУ сотрудниками была разработана математическая модель нестационарного процесса десублимации UF_6 в вертикальных транспортных емкостях (в том числе с внутренним оребрением) с учетом изменения плотности и теплопроводности UF_6 с течением времени, без использования эмпирических данных. Описание данной модели представлено в следующем разделе.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2 Математическая модель нестационарного процесса десублимации UF_6 в вертикальной погружной емкости

2.1 Объект исследования

Объектом исследования являлась вертикальная погружная емкость без оребрения. На рис. 2.1 представлена схема расчетной области для этой емкости, она представляет собой замкнутый цилиндр с теплопроводными стенками конечной толщины. Емкость изготовлена из стали марки 16ГС, высота емкости (H) составляет 2 м, радиус (R) – 0,5 м, толщина стенки (δ) – $2,0 \cdot 10^{-2}$ м. Источник тепловыделения расположен на нижней торцевой стенке.

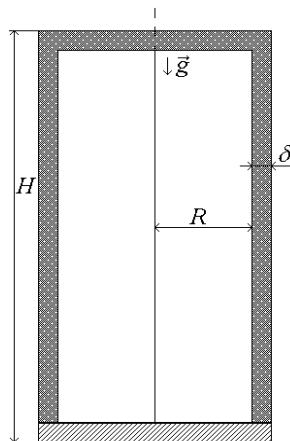


Рис. 2.1. Схема расчетной области

2.2 Двумерная математическая модель нестационарного процесса десублимации UF_6

В связи с тем, что скорость протекания процесса десублимации UF_6 зависит не только от условий теплообмена газообразного UF_6 с хладагентом, но и от условий подвода массы к поверхности теплообмена, для учета газодинамической составляющей процесс десублимации UF_6 был рассмотрен в двумерной постановке.

Емкость представляли в виде цилиндра, в который через входное отверстие в верхней части поступает газообразный UF_6 . Ось симметрии

патрубка совпадает с осью симметрии цилиндра. Расчет проводился в цилиндрической системе координат, начало которой находится в сечении входного отверстия емкости на оси симметрии цилиндра.

2.2.1 Постановка задачи

При построении двумерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF_6 сделаны следующие допущения:

1. Температура внешних поверхностей емкости постоянна и равна температуре хладагента. Температура внешней поверхности верхней эллиптической части емкости с патрубком равна температуре воздуха в помещении.

2. Процесс фазового перехода осуществляется отводом тепла через стенку емкости и слой десублимата с помощью хладагента.

3. Теплофизические свойства материала стенок не зависят от температуры.

4. Температура фазового перехода равна равновесной температуре.

5. Изменение энтальпии газообразного UF_6 при фазовом переходе ничтожно по сравнению с теплотой десублимации [2].

6. Выполняется гипотеза локального термодинамического равновесия в пределах каждой из фаз.

7. Происходит только поверхностная десублимация UF_6 на боковых и донной стенках емкости. Десублимация в объеме газообразного UF_6 отсутствует.

8. Газообразный UF_6 не содержит примесей, является вязким и теплопроводным.

9. Источник тепловыделения на нижней торцевой стенке емкости характеризуется постоянной температурой. На внешних границах емкости реализуются условия конвективного теплообмена с окружающей средой.

10. Химические реакции в рассматриваемой системе не протекают.

11. Зависимостью параметров течения газа от азимутальной координаты можно пренебречь.

Далее была проведена оценка характерных значений критериев подобия, существенных для данной задачи.

Поскольку характер газодинамических процессов во всех вертикальных погружных емкостях при их заполнении одинаков, то в качестве характерной выбрана емкость без оребрения. В качестве линейного масштаба L выбран радиус емкости. Температуру газа на входе емкости считали равной 30°C , а температуру хладагента – минус 20°C . Таким образом, характерная разница температур ΔT составляла 50°C . Давление в коллекторе на входе ёмкости P составляло 80 мм рт. ст. Для расчета температуры поверхности раздела фаз твердого и газообразного UF_6 использовали уравнение состояния:

$$P_{UF} = 133,322 \cdot \exp \left(-132,869 - \frac{344490}{T^2} + \frac{707,31}{T} + 26,436 \cdot \ln T - 0,038674 \cdot T \right), [\text{Па}]. \quad (2.1)$$

Теплофизические свойства газообразного UF_6 определяли по уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(a_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= -a_2 \frac{\partial T}{\partial x} + a_4 + a_6 \frac{\partial T}{\partial t}, \\ \alpha_w \left(a_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \beta_w T \Big|_{x=x_w} &= f_w, \\ \alpha_0 \left(a_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \beta_0 T \Big|_{x=0} &= f_0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $a_1 = \lambda$ – коэффициент теплопроводности материала, $[\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м} \cdot \text{с})]$; $a_2 = Fi \cdot \rho \cdot C_p \cdot v_k$ – коэффициент перед конвективным членом уравнения теплопроводности (Fi – доля массы в конвекции $0 < Fi < 1$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; v_k – скорость движения границы раздела газообразный – твердый UF_6 за счет фазового перехода), $[\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})]$; a_4 – источник тепла, $[\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с})]$; $a_6 = \rho \cdot C_p$ – коэффициент перед нестационарным членом уравнения теплопроводности, $[\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})]$.

Область решения разбивалась в общем случае неравномерной сеткой на N отрезков, так чтобы узлы сетки совпадали с местом контакта стенки и твердого UF₆. На i -ом интервале с шагом $h_i = x_i - x_{i-1}$ искомую функцию F и коэффициенты a_i представляли в виде многочлена первой степени:

$$\begin{aligned} T^{(i)} &= C^{(i)}x + D^{(i)}, & a_k^{(i)} &= A_k^{(i)}x + B_k^{(i)}, \quad k = 1, 2, 4, 6, \quad i = \overline{1, N}, \\ C^{(i)} &= \frac{F_i - F_{i-1}}{h_i}, & D^{(i)} &= \frac{F_{i-1}x_i - F_i x_{i-1}}{h_i}, \\ A_k^{(i)} &= \frac{a_{k,i} - a_{k,i-1}}{h_i}, & B_k^{(i)} &= \frac{a_{k,i-1}x_i - a_{k,i}x_{i-1}}{h_i}, \quad x \in [x_{i-1}, x_i]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

После интегрирования получили:

$$\begin{aligned} (A_1^{(i)}x + B_1^{(i)})\frac{\partial T}{\partial x} &= -(A_2^{(i)}\frac{x^2}{2} + B_2^{(i)}x)C^{(i)} + (A_4^{(i)}\frac{x^2}{2} + B_4^{(i)}x) + \\ &+ (A_6^{(i)}\frac{x^2}{2} + B_6^{(i)}x)\frac{\partial T}{\partial t} + C_1, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} (A_1^{(i)}x + B_1^{(i)})T^{(i)} &= (C^{(i)}\frac{x^2}{2} + D^{(i)}x) - (A_2^{(i)}\frac{x^3}{6} + B_2^{(i)}\frac{x^2}{2})C^{(i)} \\ &+ (A_4^{(i)}\frac{x^3}{6} + B_4^{(i)}\frac{x^2}{2}) + (A_6^{(i)}\frac{x^3}{6} + B_6^{(i)}\frac{x^2}{2})\frac{\partial T}{\partial t} + C_1x + C_2 = \Psi(x). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Коэффициенты динамической вязкости μ_{HF} , и коэффициент теплопроводности λ_{HF} газообразного HF рассчитывали по формулам:

$$\mu_{HF} = \left(\frac{4.610 \cdot T_r^{0.618} - 2.04 \cdot e^{-0.449 \cdot T_r} + 1.94 \cdot e^{-4.058 \cdot T_r} + 0.1}{T_c^{1/6} M_{HF}^{-1/2} P_c^{-2/3}} \right) \cdot 10^{-5}, \text{ [Па} \cdot \text{с]}; \quad (2.6)$$

$$\lambda_{HF} = 35.6 \cdot \left(\frac{T}{273} \right), \text{ [Вт/м} \cdot \text{К]}. \quad (2.7)$$

где T_r – приведенная температура HF, M_{HF} – молярная масса HF, T_c – критическая температура, P_c – критическое давление.

Расчет коэффициентов теплопроводности и вязкости бинарной газовой смеси UF₆–HF осуществляли по методу Уилке, который позволяет определять вязкость смеси со средним отклонением не более 1% от ее экспериментальных значений:

$$f_{sm} = \frac{f_{UF} \cdot m_{UF}}{m_{UF} + m_{HF} \Phi_{12}} + \frac{f_{HF} \cdot m_{HF}}{m_{HF} + m_{UF} \Phi_{21}}, \quad (2.8)$$

$$\Phi_{12} = k \cdot \frac{\left(\frac{M_{UF}}{M_{HF}}\right) \left[1 + \left(\frac{\lambda_{UF}}{\lambda_{HF}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{HF}}{M_{UF}}\right)^{1/4}\right]^2}{\left\{8 \cdot \left[1 + \left(\frac{M_{UF}}{M_{HF}}\right)\right]\right\}^{1/2}}, \Phi_{21} = k \cdot \frac{\left(\frac{M_2}{M_1}\right) \left[1 + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{1/4}\right]^2}{\left\{8 \cdot \left[1 + \left(\frac{M_1}{M_2}\right)\right]\right\}^{1/2}}, \quad (2.9)$$

где f_{sm} , f_{UF} , f_{HF} – динамическая вязкость (коэффициент теплопроводности) смеси газов, UF_6 и HF , μ_{UF} , μ_{HF} – динамическая вязкость чистых компонентов UF_6 и HF , λ_{UF} , λ_{HF} – коэффициент теплопроводности UF_6 и HF , m_{UF} , m_{HF} – массовые доли UF_6 и HF .

При расчете динамической вязкости $k=1$, а при расчете коэффициента теплопроводности $k=0,85$.

Для определения коэффициента диффузии бинарной смеси UF_6 – HF использовали формулу:

$$D_{12} = \frac{AT^{3/2} \left(\frac{1}{M_{UF}} + \frac{1}{M_{HF}} \right)^{1/2}}{P \left(V_{k_{UF}}^{1/3} + V_{k_{HF}}^{1/3} \right) \left[1 + \left(BT_{k_{UF-HF}} / T \right) \right]}, \quad (2.10)$$

$$T_{k_{UF-HF}} = \sqrt{T_{k_{UF}} + T_{k_{HF}}}, \quad (2.11)$$

где V_k и T_k – критический объем ($см^3/моль$) и критическая температура (К) газов, M – молярные массы веществ ($кг/моль$), P – давление (атм).

Для системы, включающей смесь полярного (HF) и неполярного (UF_6) газов авторами [71] рекомендовано использовать значения $A=0,02023$, $B=0,90116$.

Для оценки характерных времен задачи определяли характерную скорость движения фронта фазового перехода U_{gran} и характерную скорость течения газа U_{gas} в емкости. Расчет U_{gran} осуществлялся с использованием условия Стефана:

$$U_{gran} = \frac{\lambda_s}{\rho_s L_{UF}} \frac{\Delta T}{L}, \quad [м/с], \quad (2.12)$$

которая связана с U_{gas} соотношением:

$$U_{gas} \rho_{UF} = U_{gran} \rho_U, \quad (2.13)$$

откуда

$$U_{gas} = \frac{\rho_{UF} U_{gran}}{\rho_U}, [\text{м/с}]. \quad (2.14)$$

Для рассматриваемой емкости $U_{gran}=5,656 \cdot 10^{-8}$ м/с и $U_{gas}=1,18 \cdot 10^{-8}$ м/с. Значения характерных времен задачи определяли по формулам:

$$\tau_1=L/U_{gas}, \tau_2=L/U_{gran}, \tau_3=L/a, \quad (2.15)$$

где τ_1 – термодинамическое, τ_2 – конвективное и τ_3 – гидродинамическое время; a – скорость звука, для оценки которой используется формула $a=(\gamma RT/M_{UF})^{1/2}$, $R=8314$ Дж/кмоль·К – универсальная газовая постоянная.

Получили значения $\tau_1=10,6 \cdot 10^6$ с (2946,9 часа), $\tau_2=5,07 \cdot 10^3$ с (84,5 мин.), $\tau_3=6,896 \cdot 10^{-3}$ с.

В связи с тем, что характерные гидродинамическое и конвективное времена малы, по сравнению с характерным термодинамическим временем, сделано заключение, что равновесное состояние конвективного и гидродинамического процессов наступает существенно раньше равновесного состояния тепло– и массообменных процессов, поэтому характер течения газообразного UF_6 оказывает влияние на процесс десублимации UF_6 только на его начальной нестационарной стадии. После установления гидростатического давления в емкости (в случае отсутствия нестационарных возмущений) допускается рассмотрение задачи в стационарном приближении.

Число Рейнольдса для рассматриваемой задачи

$$Re = \frac{\rho U_{gas} L}{\mu} \approx 10, \quad (2.16)$$

следовательно, течение в емкости является вязким и ламинарным.

Число Маха M и параметр гидростатической сжимаемости ε_g :

$$M = \frac{U_{gas}}{a} \approx 10^{-6}, \varepsilon_g = \frac{gLM}{RT} \approx 10^{-2}. \quad (2.17)$$

Поскольку $M \ll 1$ и $\varepsilon_g \ll 1$, то течение газообразного UF_6 в емкости будет дозвуковым и несжимаемым.

О соотношении конвективного и диффузионного массопереноса газообразного UF_6 можно судить по величине числа Пекле:

$$Pe = \frac{\rho_g c_p UL}{\lambda_g} \approx 10^{-2}. \quad (2.18)$$

Для рассматриваемого случая оценка числа Пекле показывает, что в газовой фазе доминирующими механизмами тепло– и массопереноса являются теплопроводность и диффузия.

Подобие температурных и скоростных полей определяется величиной числа Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda_g} \approx 10^{-3}. \quad (2.19)$$

Поскольку значение критерия подобия существенно меньше 1, то можно сказать, что интенсивность изменения температурных полей в емкости выше, значит характерные времена задачи вычислены правильно.

Для описания такого течения газообразного UF_6 использовали систему уравнений газовой динамики [72], которая в векторной форме выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot \rho \mathbf{V} = 0, \quad (2.20)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \tau} + \rho \left(\mathbf{V} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \right) \mathbf{V} = - \frac{\partial P}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot \mu \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{r}} \right) + \rho \mathbf{g}, \quad (2.21)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho \mathbf{V} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot \mathbf{q}_i, \quad (2.22)$$

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial \tau} + \rho \mathbf{V} \cdot \frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot \mathbf{J}_i, \quad (2.23)$$

$$p = \rho TR \sum_{i=1}^{N_k} \frac{c_i}{m_i}. \quad (2.24)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор; \mathbf{V} – тензор скоростей; \mathbf{q} – вектор плотности теплового потока; \mathbf{J} – вектор плотности потока массы i -ой компоненты; i – номер компоненты; N_k – число компонент смеси; m_i – молекулярный вес i -ой компоненты.

В цилиндрической системе координат система уравнений (2.20)–(2.24) запишется в виде:

$$\frac{\partial r \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial r \rho u}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v}{\partial z} = 0, \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial r \rho u}{\partial \tau} + \frac{\partial r \rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v u}{\partial z} = -\frac{\partial r P}{\partial r} + r \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial r \rho v}{\partial \tau} + \frac{\partial r \rho u v}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v^2}{\partial z} = -\frac{\partial r P}{\partial z} - \rho u v + r \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + r \rho g, \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial r c \rho T}{\partial \tau} + \frac{\partial r \rho u T}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial r \rho T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial r \rho T}{\partial z} \right), \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial r \rho c_i}{\partial \tau} + \frac{\partial r \rho u c_i}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v c_i}{\partial z} = \frac{\partial r J_{ir}}{\partial r} + \frac{\partial r J_{iz}}{\partial z}, \quad (2.28)$$

Для определения температуры в слое образовавшегося десублимата (твердого UF_6) и величины теплового потока от газообразного UF_6 через слой десублимата и стенку емкости к хладагенту использовали стандартное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial r c \rho T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{\text{UF}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \lambda_{\text{UF}} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2.29)$$

Для замыкания полученной системы уравнений использовали температурные зависимости (2.16) – (2.19), уравнение состояния (2.24) и уравнение теплопроводности (2.29).

После вычисления тепловых потоков на внутренней и внешней поверхности стенок по условию Стефана (2.30) определялась масса перешедшего в твердое состояние UF_6 и скорость движения поверхности раздела фаз.

$$\rho_U v_w(t) L = \lambda_{\text{UF}} \frac{\partial T}{\partial r} \bigg|_{r=r_w}. \quad (2.30)$$

При решении уравнений (2.24) – (2.28) определяли скорости течения газовой смеси (UF_6 и HF) и давление в объеме емкости, занятом ею. Температура фазового перехода UF_6 определялась методом бисекций [73] по зависимости давления насыщенных паров UF_6 от температуры над поверхностью фазового перехода (уравнение (2.1)). Температура внешней поверхности емкости, согласно принятому допущению 2, равна температуре хладагента.

Считали, что перед началом десублимации стенки емкости (за исключением верхней) охлаждены до температуры хладагента. Толщина слоя десублимата в начальный момент времени равна нулю.

Для скорости течения газообразного UF_6 на верхней стенке емкости задавали условия прилипания и непротекания. Считали, что на боковой и донной поверхностях емкости скорость течения газообразного UF_6 равна скорости десублимации.

2.2.2 Метод решения

В работе для дискретизации полученной системы дифференциальных уравнений использован метод КО [74]. Расчетную область разбивали на некоторое число непересекающихся КО таким образом, что каждая узловая точка содержится только в одном из них. Система дифференциальных уравнений интегрировалась по каждому КО. Полученный таким образом дискретный аналог позволял проводить расчеты на неструктурированных сетках и обеспечивал точное интегральное сохранение таких величин, как масса, импульс и энергия на любой группе КО.

Для определения параметров течения газообразного UF_6 в объеме емкости и расчета теплопроводности в слое десублимата и стенке емкости в двумерной математической модели процесса десублимации UF_6 применяли метод, основанный на использовании полунейвной процедуры Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation (SIMPLE), различные модификации и детальное описание которого содержится в работах [75, 76]. Этот метод является одним из наиболее распространенных и эффективных алгоритмов решения задач дозвуковых течений газовых смесей [74].

Решение задачи, в рамках данного подхода, получали на разнесенной (шахматной) разностной сетке (рис. 2.4) в переменных скорость–давление на основе глобальной итерационной процедуры, каждый шаг которой включал решение эллиптического уравнения нахождения поправки давления и решение разностных аналогов уравнений переноса импульса, энергии и массы [76].

Особенность разнесенной разностной сетки заключается в том, что центры КО для составляющих скорости течения газообразного UF_6 располагаются на гранях КО остальных переменных (давление, температура). Прямым следствием введения такой сетки является определение массового расхода через грани КО без интерполяции соответствующих составляющих скорости. Таким образом, только физические поля скоростей (V) и давления (P) могут удовлетворять уравнению закона сохранения массы [76]. Другим преимуществом этого способа построения разностной сетки является возможность более строго и физически обоснованно задать граничные условия для всех переменных.

При построении разностной сетки использовали метод с явным выделением фронта фазового перехода [77], базирующийся на методе динамической адаптации расчетной сетки к искомому решению [78]. Преобразование расчетной сетки осуществлялось автоматически после определения скорости десублимации газообразного UF_6 и скорости движения границы раздела фаз.

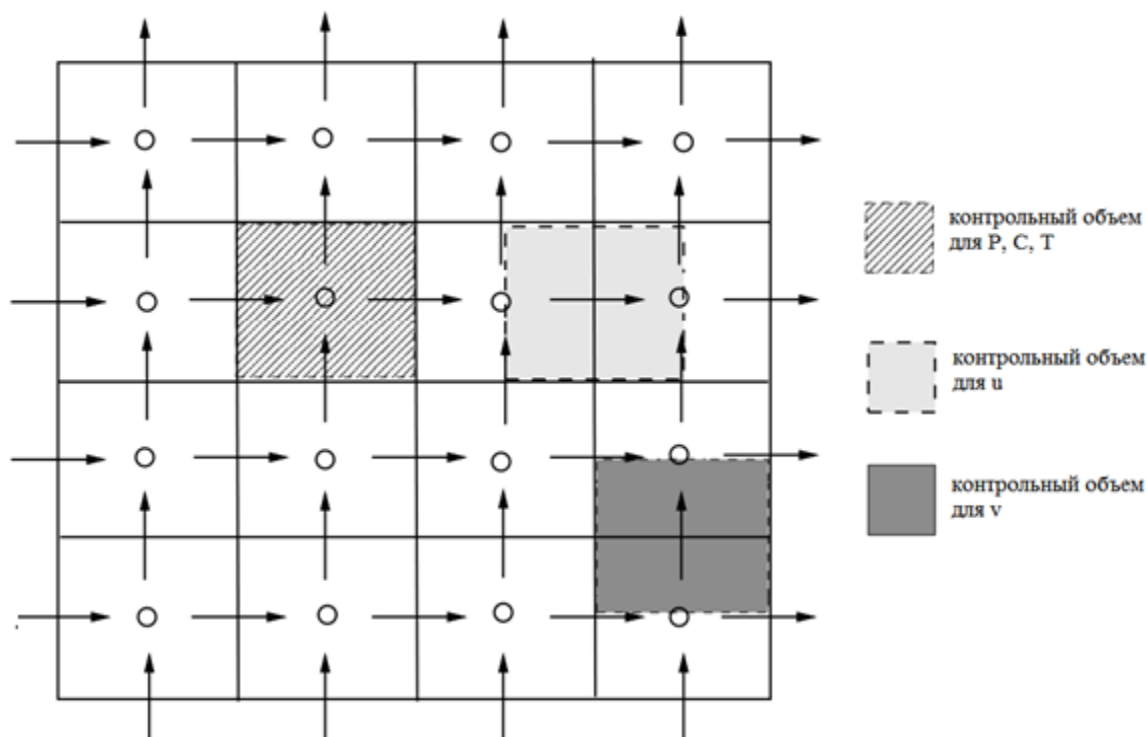


Рисунок 2.4 – КО для разнесенной (шахматной) разностной сетки

Такой подход позволяет производить автоматическое разбиение расчетной области расчетной сеткой с соблюдением всех ее геометрических размеров, в том числе учитывать эллиптичность торцевых стенок емкости.

Для отслеживания положения границы фазового перехода около боковой и донной стенок емкости в начальный момент времени вводился дополнительный КО, необходимый для учета толщины слоя десублимата (рис. 2.5). С течением времени происходит охлаждение газообразного UF_6 и его десублимация на стенках емкости, поэтому требуется провести перерасчет разностной сетки с учетом изменения толщины слоя десублимата.

Определение величины приращения слоя десублимата за шаг времени δt в каждой из граничащих с поверхностью раздела фаз КО осуществляли при совместном решении системы уравнений (2.25)–(2.29), после чего вычисляли массу газообразного UF_6 перешедшего в твердое состояние и приращение массы десублимата.

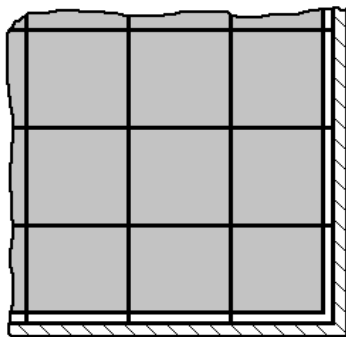


Рисунок 2.5 – Положение КО в начальный момент времени около боковой стенки емкости

- – основная расчетная сетка в объеме газовой фазы,
- – дополнительный КО, ▨ – стенка емкости

Затем дополнительный КО, отвечающий за слой твердого UF_6 , увеличивался, а приграничная к поверхности фазового перехода ячейка с газообразным UF_6 пропорционально уменьшалась, после чего происходил пересчет центров этих КО, т.е. изменение положения расчетных узлов сетки связано со скоростью движения границы фазового перехода UF_6 .

По мере заполнения емкости твердым UF_6 с течением времени граничащий с фронтом фазового перехода КО, содержащий газообразный UF_6 , постепенно уменьшался. При большой разнице объемов соседних ячеек возможно возникновение неустойчивого решения, в связи с этим при реализации сеточного генератора была предусмотрена возможность слияния и разъединения КО, граничащих с поверхностью раздела фаз.

По мере увеличения толщины слоя десублимата и уменьшении объема газообразного UF_6 граничащего с поверхностью фазового перехода КО более, чем на 75% от его первоначального значения, происходило слияние двух КО (рис. 2.6).

После объединения КО и до момента, когда объем КО, содержащий твердый UF_6 , станет равен или больше 125% своего первоначального объема, дополнительный КО на границе раздела фаз имеет нулевую толщину и движется вместе с фронтом фазового перехода. Затем аналогичным образом происходит разделение КО внутри слоя твердого UF_6 (рис. 2.7).

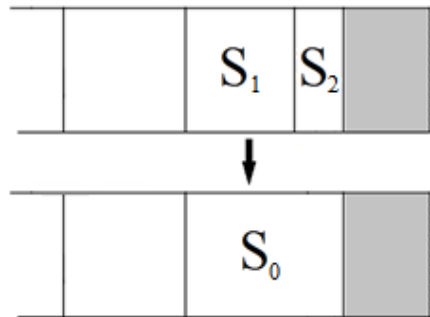


Рисунок 2.6 – Объединение КО

S_1, S_2 – объединяемые контрольные объемы, S_0 – КО после объединения

□ – объем, занятый смесью газообразных UF_6 и HF , – объем, занятый твердым UF_6

При разделении КО в слое твердого UF_6 также должны выполняться законы сохранения массы и энергии:

$$\begin{cases} \iint_{S_0} r \rho_{UF} drdz = \iint_{S_1} r \rho_{UF} drdy + \iint_{S_2} r \rho_{UF} drdz, \\ \iint_{S_0} r \rho_{UF} C_{pUF} T_{UF} drdz = \iint_{S_1} r \rho_{UF} C_{pUF} T_{UF} drdz + \iint_{S_2} r \rho_{UF} C_{pUF} T_{UF} drdz, \end{cases} \quad (2.32)$$

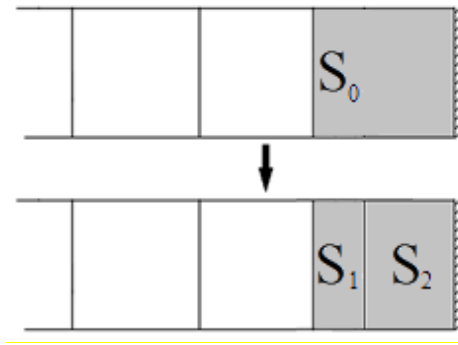


Рисунок 2.7 – Разделение ячеек

S_0 – разделяемый КО, S_1 , S_2 – контрольные объемы после разделения

□ – объем, занятый смесью газообразных UF_6 и HF, – объем, занятый твердым UF_6

После разделения КО S_2 приобретает первоначальный объем, а дальнейшее изменение объема КО S_1 происходит уже в соответствии с вычисляемой скоростью десублимации UF_6 .

Таким образом, используемый алгоритм построения адаптивной сетки основан на том, что в неподвижной и неизменной сетке происходит движение границы фазового перехода за счет взаимного изменения размеров приграничных КО в газообразной и твердой фазах UF_6 . Рассмотренный алгоритм адаптации сетки [77] позволяет учитывать неравномерность скорости десублимации UF_6 на внутренних стенках емкости.

Поскольку дифференциальные уравнения (2.26) – (2.28) подчиняются обобщенному уравнению переноса, то при обозначении зависимой переменной буквой φ , обобщенное дифференциальное уравнение, представляющее закон сохранения для этой переменной в цилиндрических координатах, примет вид

$$\frac{\partial r \rho \varphi}{\partial \tau} + \frac{\partial r \rho u \varphi}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \cdot r \Gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot r \Gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S_{\varphi}, \quad (2.33)$$

где Γ – коэффициент диффузионного переноса, S_{φ} – источниковый член.

В обобщенное дифференциальное уравнение (2.33) входят четыре члена: нестационарный, конвективный, диффузионный и источниковый. Вид коэффициента диффузионного переноса Γ зависит от переменной φ , в качестве

которой могут использоваться u , v , c_i и T . Для скоростей u , v (уравнения (2.26) и (2.27)) Γ равен коэффициенту динамической вязкости, для температуры и концентрации (уравнения (2.328) и (2.29)) – коэффициенту диффузии и теплопроводности соответственно.

Уравнение (2.31) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial r \rho \varphi}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho u \varphi - r \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \rho v \varphi - r \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = S_{\varphi}. \quad (2.34)$$

Вводим суммарные диффузионный и конвективный потоки J_r , J_z :

$$J_r = r \rho u \varphi - r \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad J_z = r \rho v \varphi - r \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Тогда

$$\frac{\partial r \rho \varphi}{\partial \tau} + \frac{\partial J_r}{\partial r} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = S_{\varphi}. \quad (2.35)$$

После интегрирования полученного уравнения (2.35) для КО (рис. 2.8) по пространственным координатам – δr , δz с шагом по времени τ , получили:

$$\begin{aligned} \frac{r \rho (\varphi - \varphi^0)}{\tau} + \frac{(J_e - J_w)}{\delta r} + \frac{(J_s - J_n)}{\delta z} &= S_{\varphi}, \\ \frac{r \rho (\varphi_p - \varphi_p^0) \delta r \delta z}{\tau} + (J_e - J_w) + (J_s - J_n) &= S_{\varphi}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

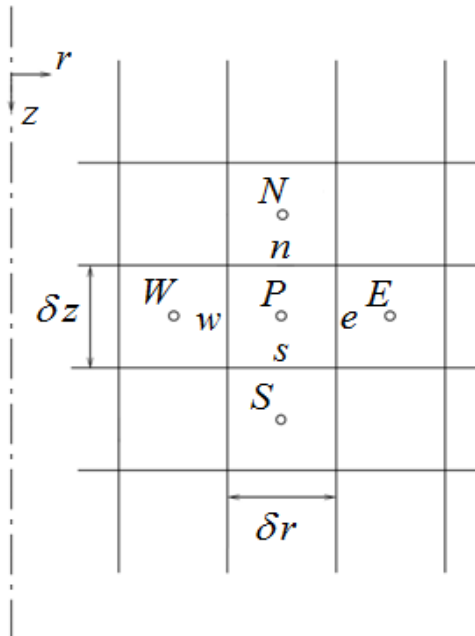


Рис. 2.8. Схема КО.

W, P, E, N, S – узловые точки, w, e, n, s – границы КО, δr – шаг сетки по координате r , δz – шаг сетки по координате z .

По КО интегрируется также уравнение закона сохранения массы (2.25), при этом вводятся массовые расходы F через грани КО:

$$F_z = r \rho u \Delta S_z, \quad F_r = r \rho v \Delta S_r,$$

где ΔS_r и ΔS_z – площади боковых граней.

В итоге получили:

$$\frac{r(\rho - \rho^0)\delta r \delta z}{\tau} + (F_e - F_w) + (F_s - F_n) = 0. \quad (2.37)$$

Уравнение (2.36) умножаем на φ_p

$$\frac{r_p(\rho_p - \rho_p^0)\varphi_p \delta r \delta z}{\tau} + (F_e \varphi_p - F_w \varphi_p) + (F_s \varphi_p - F_n \varphi_p) = 0. \quad (2.38)$$

После вычитания уравнения (2.37) из уравнения (2.38):

$$\begin{aligned} & \frac{r_p(\rho_p \varphi_p^0 - \rho_p^0 \varphi_p)\varphi_p \delta r \delta z}{\tau} + (J_e - F_e \varphi_p) - \\ & - (J_w + F_w \varphi_p) + (J_s - F_s \varphi_p) - (J_n + F_n \varphi_p) = S. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Для вычисления значений конвективных членов $(F\varphi)$ уравнения (2.39) использовалась схема донорных ячеек [76, 77]. Дискретизацию суммарных потоков (J) проводили по схеме со степенным законом [76, 77]:

$$\begin{aligned} (J_e - F_e \varphi_p) &= a_e (\varphi_P - \varphi_E), \\ (J_w - F_w \varphi_p) &= a_e (\varphi_W - \varphi_P), \\ (J_n - F_n \varphi_p) &= a_e (\varphi_N - \varphi_P), \\ (J_s - F_s \varphi_p) &= a_e (\varphi_P - \varphi_S), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_e &= D_e \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_e)^5, 0\right) + \text{Max}(F_e, 0), \\ a_w &= D_w \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_w)^5, 0\right) + \text{Max}(-F_w, 0), \\ a_n &= D_n \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_n)^5, 0\right) + \text{Max}(F_n, 0), \\ a_s &= D_s \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_s)^5, 0\right) + \text{Max}(-F_s, 0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_e &= \frac{r_e \Gamma_e \Delta S_r}{\delta r}, & P_e &= \frac{F_e}{D_e} = \frac{\rho_e u_e \delta r}{\Gamma_e}, \\
D_w &= \frac{r_w \Gamma_w \Delta S_r}{\delta r}, & P_w &= \frac{F_w}{D_w} = \frac{\rho_w u_w \delta r}{\Gamma_w}, \\
D_n &= \frac{r_n \Gamma_n \Delta S_z}{\delta z}, & P_n &= \frac{F_n}{D_n} = \frac{\rho_n v_n \delta z}{\Gamma_n}, \\
D_s &= \frac{r_s \Gamma_s \Delta S_z}{\delta z}, & P_s &= \frac{F_s}{D_s} = \frac{\rho_s v_s \delta z}{\Gamma_s},
\end{aligned}$$

где D – диффузионная проводимость, P – сеточное число Пекле.

Таким образом, двумерный дискретный аналог записали в виде:

$$a_p \varphi_P = a_e \varphi_E + a_w \varphi_W + a_n \varphi_N + a_s \varphi_S + b \quad (2.40)$$

или

$$a_p \varphi_P = \sum a_{nb} \varphi_{nb} + b, \text{ где}$$

$$\begin{aligned}
a_e &= \text{Max}(F_e, 0) + D_e \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_e)^5, 0\right), \\
a_w &= \text{Max}(-F_w, 0) + D_w \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_w)^5, 0\right), \\
a_n &= \text{Max}(F_n, 0) + D_n \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_n)^5, 0\right), \\
a_s &= \text{Max}(-F_s, 0) + D_s \text{Max}\left(1 - (0.1 \cdot P_s)^5, 0\right),
\end{aligned} \quad (2.41)$$

$$b = \frac{r_p^0 \varphi_p^0 \rho_p^0 \delta z \delta r}{\tau},$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + \frac{r_p \varphi_p \rho_p \delta z \delta r}{\tau}. \quad (2.42)$$

Здесь индекс ⁰ означает, что значения величин приведены для текущего времени τ , все другие величины не известны для времени $\tau + \delta\tau$.

Рассмотрим используемый в алгоритме SIMPLE способ преодоления трудностей расчета поля скорости течения газообразного UF_6 V , возникающих при решении уравнений газовой динамики (2.25) – (2.28) и связанных с неизвестным полем давления газовой смеси P и нелинейностью уравнений переноса импульса (2.26), (2.27). Поскольку при вычислении параметров течения газовой смеси в емкости поле давления представляет собой часть решения исходной системы уравнений, которое не может быть известно

заранее, а взаимосвязь между давлением и скоростью накладывает ограничение на поле скоростей течения V , то только подстановка расчетных значений давления в уравнение импульса происходит до тех пор, пока не получим значения скоростей, удовлетворяющие уравнению закона сохранения массы (2.25).

Результирующие дискретные аналоги уравнений законов сохранения импульса (2.26), (2.27) имеют вид:

$$a_p u_P = \sum a_{nb} u_{nb} + (P_w - P_e) \delta r + b, \quad (2.43)$$

$$a_p v_P = \sum a_{nb} v_{nb} + (P_n - P_s) \delta z + b. \quad (2.44)$$

Уравнения (2.43), (2.44) можно решить только в том случае, если поле давления задано или каким-либо образом определено. Процесс вычисления начинали с задания предварительного поля давления P^* на первом расчетном шаге по времени в качестве него принимали начальное давление в емкости, а на последующих – значение давления с предыдущей итерации. С использованием значений P^* осуществляли вычисление приближенных значений радиальной и аксиальной компонент скорости u^* и v^* :

$$a_p u_P^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (P_w^* - P_e^*) \delta r + b, \quad (2.45)$$

$$a_p v_P^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (P_n^* - P_s^*) \delta z + b. \quad (2.46)$$

Приближенное поле скоростей после решения уравнений движения (2.45), (2.46) в общем случае не удовлетворяет уравнению закона сохранения массы (2.24). В связи с этим давление представляли, как сумму его предварительного значения P^* и поправки P' . Причем поправку к давлению выбирали таким образом, чтобы поле давлений P обеспечивало выполнение закона сохранения массы:

$$P = P^* + P'. \quad (2.47)$$

Аналогичным образом вводили поправку к скорости:

$$u = u^* + u', \quad (2.48)$$

$$v = v^* + v'. \quad (2.49)$$

После вычитания уравнений (2.48) и (2.49) из (2.45) и (2.46) и отбрасывания членов $\Sigma a_{nb} v'_{nb}$ и $\Sigma a_{nb} u'_{nb}$ (правомерность этого описана в работах [76, 77]) получены поправочные формулы для составляющих скорости:

$$u'_p = d_p (P'_w - P'_e), \quad d_p = \frac{\delta r}{a_p}, \quad (2.50)$$

$$v'_p = d_p (P'_n - P'_s), \quad d_p = \frac{\delta z}{a_p}, \quad (2.51)$$

где значения коэффициентов a_p определяются уравнением (2.42) и связаны с влиянием конвективных и диффузионных процессов на гранях КО.

При подстановке в уравнение закона сохранения массы (2.24) вместо составляющих скорости их выражений из поправочных формул (2.50) и (2.51) получено уравнение для определения поправки на давление:

$$a_p P'_p = a_e P'_e + a_w P'_w + a_n P'_n + a_s P'_s + b, \quad (2.52)$$

где

$$a_e = r_e \rho_e d_e \delta r, \quad a_w = r_w \rho_w d_w \delta r,$$

$$a_n = r_n \rho_n d_n \delta z, \quad a_s = r_s \rho_s d_s \delta z,$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s,$$

$$b = \frac{r_p (\rho_p^0 - \rho_p) \delta z \delta r}{\tau} + \left[(r \rho u^*)_w - (r \rho u^*)_e \right] \delta r + \left[(r \rho v^*)_s - (r \rho v^*)_n \right] \delta z.$$

Видно, что в уравнении (2.52) член поправки давления b равен левой части дискретного аналога уравнения закона сохранения массы (2.37), записанного через приближенные значения составляющей скорости u^* , v^* . Равенство $b=0$ является критерием сходимости решения и означает, что эти составляющие скорости вместе со значением $(\rho_p^0 - \rho_p)$ удовлетворяют уравнению закона сохранения массы и не требуют корректировки давления.

Общий алгоритм численного расчета процесса десублимации UF_6 в емкости выглядит следующим образом:

- 1) Выбор начального приближения для всех переменных (u, v, P, T).
- 2) Решение уравнений движения (2.26) и (2.27) для определения приближенных значений, составляющих вектора скорости течения u^*, v^* .
- 3) Решение уравнения для поправки к давлению (2.52).
- 4) Нахождение скорректированного поля давления P^* по уравнению (2.47) и проверка сходимости решения. В случае, если сходимость не достигнута, возвращение к пункту 2 с использованием вычисленных значений u^*, v^*, p^* в качестве начального приближения.
- 5) Расчет поправок для компонент скорости по формулам (2.52) и (2.53).
Определение скорректированных значений скорости (2.45), (2.46).
- 6) Расчет температуры газовой смеси по формуле (2.28).
- 7) Расчет концентрации UF_6 в газовой смеси по формуле (2.29).
- 8) Расчет теплообмена газообразного UF_6 с хладагентом через стенку емкости и слой десублимата по формуле (2.30).
- 9) Определение скорости десублимации UF_6 и перерасчет разностной сетки.
- 10) Расчет массы десублимированного UF_6 .
- 11) Представление скорректированного давления как начального и переход на новый шаг по времени. Возврат к пункту 2 и повторение всей цепочки действий до достижения момента времени, когда емкость будет заполнена до необходимой степени.

2.3 Проверка на адекватность газодинамической составляющей разработанной модели

Проверка на адекватность газодинамической составляющей разработанной математической модели процесса десублимации UF_6 проведена на задаче естественно-конвективного течения газообразного UF_6 в вертикальной цилиндрической емкости при наличии источника тепловыделения на ее нижней торцевой стенке.

Считали, что в начальный момент времени газообразный UF_6 и стенки емкости охлаждены до $T_0=300$ К, давление газообразного UF_6 под верхней стенкой емкости равно 70 мм рт. ст. и имеет гидростатическое распределение по высоте емкости. Температура источника тепла, который находится на нижней торцевой стенке емкости постоянна и равна $T_l=400$ К. Параметры конвективного теплообмена на внешней поверхности стенок емкости: температура окружающей среды $T_\infty=300$ К и коэффициент теплообмена $\alpha=5$ Вт/м²·К.

Граничные условия на оси симметрии:

$$\frac{\partial u}{\partial r}=0, \quad \frac{\partial v}{\partial r}=0, \quad \frac{\partial P}{\partial r}=0, \quad \frac{\partial T}{\partial r}=0, \quad \text{при } r=0,$$

на границе раздела стенки емкости и газообразного UF_6 :

$$\frac{\partial u}{\partial r}=0, \quad \frac{\partial v}{\partial r}=0, \quad \lambda_{UF} \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_{st} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad T_{UF} = T_{st}, \quad \text{при } r=R;$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}=0, \quad \frac{\partial v}{\partial z}=0, \quad \lambda_{UF} \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_{st} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad T_{UF} = T_{st}, \quad \text{при } z=H;$$

на внешней границе емкости:

$$\lambda_{st} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha (T_\infty - T).$$

Методом Патанкара с первым порядком точности по времени и вторым по пространству решали систему уравнений (2.25)–(2.29) разнесенной разностной сетке размером 100×200 ячеек. Для аппроксимации диффузионных слагаемых применяли схему с степенным законом, для конвективных – «схему против потока» [9].

Результаты приведены на рисунке 2.10. Видно, что из-за формирования термического факела максимальная температура достигается на оси симметрии емкости. При этом из-за образования нисходящего потока можно заметить продвижение фронта пониженной температуры к цилиндрической стенке в верхней части расчетной области.

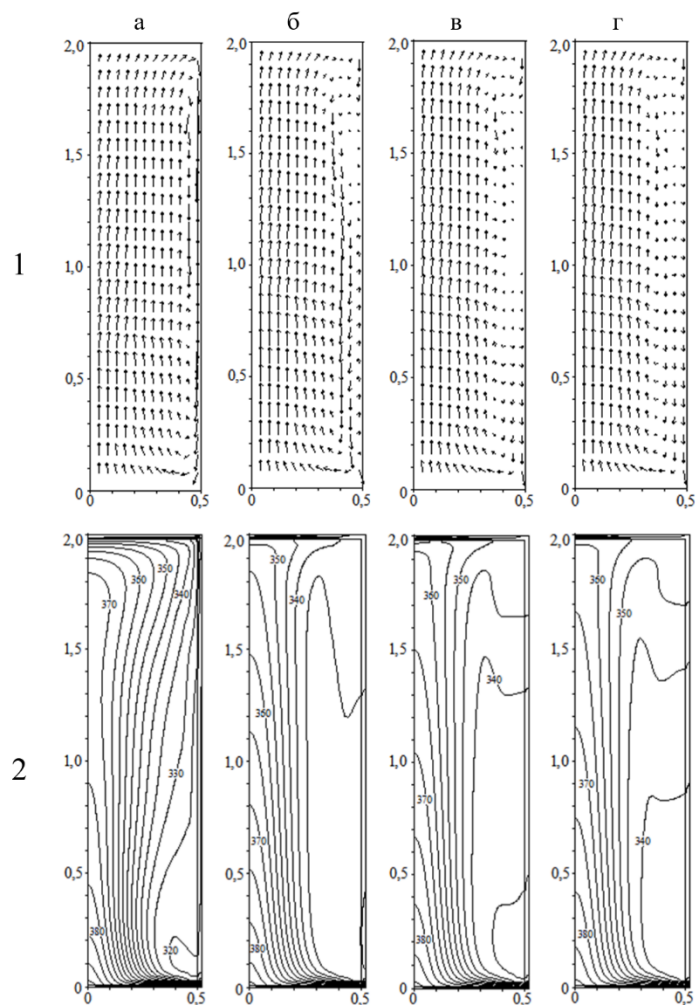


Рис. 2.10. Вектора скорости (1) и изотермы (2) газообразного UF_6 в различные моменты времени

а) $\tau=50$ с, б) $\tau=100$ с, в) $\tau=150$ с, г) $\tau=200$ с

На рис. 2.11.а и 2.11.б представлена динамика изменения температуры газообразного UF_6 на оси симметрии (в сечении $r=0$) и в поперечном сечении емкости (при $z=1,0$ м). Показано, что с течением времени происходит повышение температуры газа во всей расчетной области, а в момент времени $\tau=100$ с в зоне $0,2 < R < 0,44$ м происходит локальное понижение температуры, обусловленное наличием нисходящего газового потока.

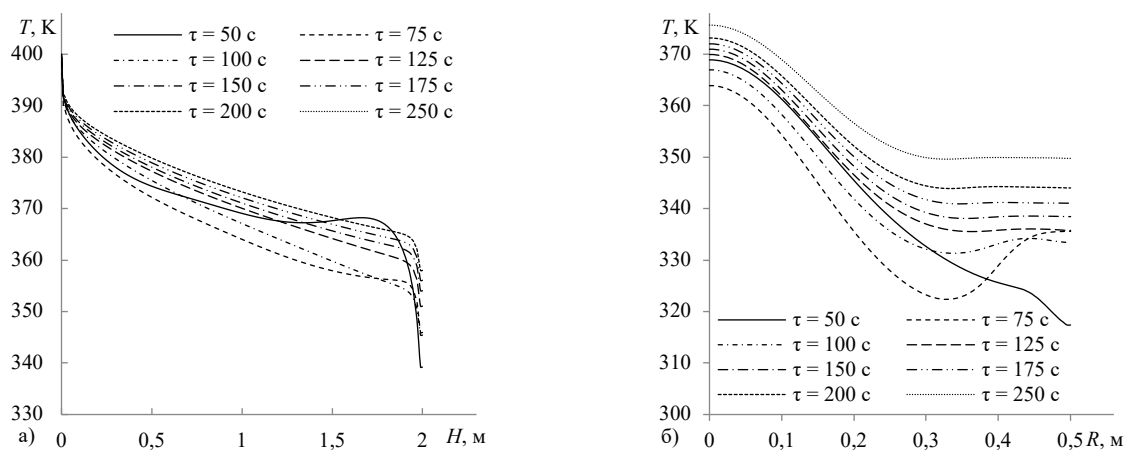


Рис. 2.11. Профили температуры на оси симметрии (а), в поперечном сечении емкости при $z=1,0$ м (б)

Интенсивность восходящих и нисходящих потоков газообразного гексафторида урана характеризуется динамикой изменения профилей вертикальной компоненты скорости, представленной на рисунке 2.12.

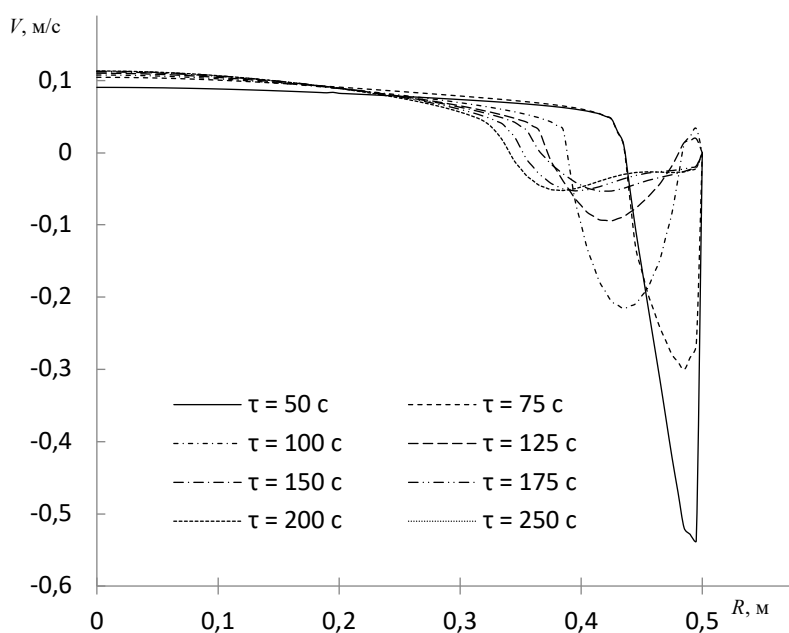


Рис. 2.12. Профили вертикальной компоненты скорости при $z=1,0$ м

Постепенное выравнивание профиля вертикальной компоненты скорости с уменьшением интенсивности нисходящего потока объясняется уменьшением скорости конвекции вместе с падением градиента температуры со временем τ .

Расчет среднего числа Нуссельта на поверхности нижней торцевой стенки емкости проведен в интервале температур источника тепловыделения 310...400 К для емкостей с толщиной стенки $\delta=1,0 \cdot 10^{-2}$, $2,0 \cdot 10^{-2}$ и $5,0 \cdot 10^{-2}$ м по формуле:

$$Nu_{avg} = \int_0^R q_c / q_\lambda \big|_{H=0} dr ,$$

где q_λ – тепловой поток за счет теплопроводности, q_c – тепловой поток за счет конвекции.

Полученная зависимость представлена на рисунке 2.13.

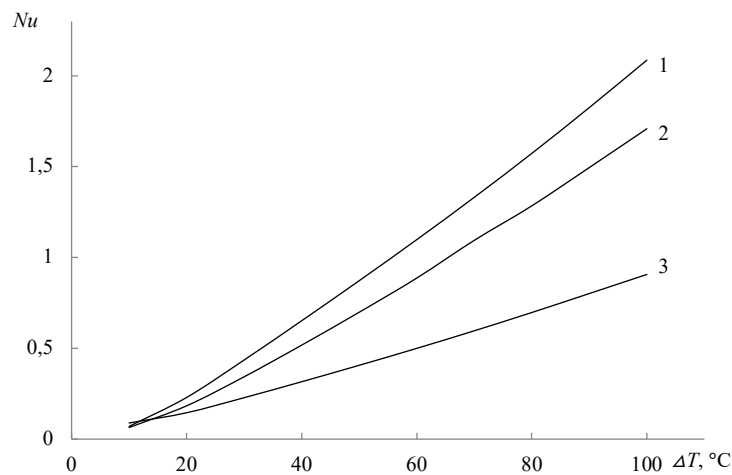


Рис. 2.13. Зависимость среднего числа Нуссельта от температуры нагрева при $\delta=5,0 \cdot 10^{-2}$ (1), $2,0 \cdot 10^{-2}$ (2) и $1,0 \cdot 10^{-2}$ м (3)

Из рисунка 2.13 видно, что увеличение Nu_{avg} происходит вследствие увеличения градиента температур и толщины стенки емкости. Снижение средней температуры в области решения и ослабление интенсивности возникающего конвективного течения происходит из-за снижения температуры источника.

Таким образом, нами численно решена задача естественно-конвективного течения газообразного UF_6 в вертикальной цилиндрической емкости при наличии источника тепла на ее нижней стенке в условиях конвективного теплообмена емкости с окружающей средой.

Результаты подтверждают адекватность математической модели, описывающей свободно-конвективное течение газообразного гексафторида урана, происходящее при его десублимации в вертикальной цилиндрической емкости без оребрения. Они имеют хорошую сходимость с известными литературными данными [10, 11].

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

3.1 Техничко–экономическое обоснование ВКР

В данной работе рассматривается вопрос о создании нестационарной математической модели десублимации газообразного UF_6 на гладкой теплообменной поверхности.

Научно–исследовательская работа (НИР) – это комплекс разнородных процессов труда, направленных на решение определённых научных и технических проблем. Для того, чтобы затраты на НИР давали полную отдачу, необходимо при планировании, организации и проведении НИР, обеспечить её максимальную эффективность в отношении качества и времени выполнения работ. Целью планирования НИР является организация научного исследования, определение требуемого количества исполнителей по теме и сметы затрат по выполнению работ.

Разные исследования, в зависимости от задач, поставленных перед исполнителями, классифицируются следующим образом:

- а) Теоретические или фундаментальные.
- б) Поисковые.
- в) Прикладного характера

Теоретические – это такие работы, которые проводятся в малоисследованных областях науки. Итогом их является установление общих закономерностей протекания тех или иных процессов.

Поисковые – это работы, проводимые с целью выявления каких-либо законов и закономерностей.

Целью прикладной НИР является техническое и экономическое обоснование нового технологического процесса.

Данная работа относится к числу поисковых работ.

Цели и задачи раздела:

Целью данного раздела является расчёт экономических показателей проверки на адекватность газодинамической составляющей разработанной математической модели процесса десублимации UF₆.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Проведение SWOT-анализа;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной эффективности исследования.

3.1.1 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT–анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT – анализ состоит из трех этапов. В первом этапе мы анализируем сильные и слабые стороны исследовательской работы (внутренняя среда), а также возможности и угрозы (внешняя среда). Описание выполняется с помощью факторов, не имеющих количественной оценки (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Экономичность и энергоэффективность технологии.	Сл1. Технология применима не для всех предприятий.
С2. Экологичность метода. При работе на установке все выделяемые вещества находятся, в пределах нормы, не происходит загрязнения окружающей среды.	Сл2. Отсутствие собственной сырьевой базы (гексафторид урана).
С3. Процесс десублимации UF ₆ оптимизирован, уменьшение потери целевого продукта.	
С4. Отличная от конкурентов технология.	
Возможности	Угрозы
В1. Создание более оптимизированной технологии.	У1. Создание схожей технологии для горизонтальных емкостей.
В2. Появление дополнительного спроса на технологию.	У2. Отсутствие спроса на новые технологии.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа построили интерактивную матрицу проекта (таблица 3.2). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 3.2 – интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта.		C1.	C2.	C3.	C4.
	B1.	+	+	+	0
	B2.	+	+	+	0
Угрозы проекта.	Y1.	0	0	+	-
	Y2.	+	0	+	0
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта.		Сл1.		Сл2.	
	B1	+		+	
	B2.	+		+	
Угрозы проекта.	Y1.	-		-	
	Y2.	-		-	

Третий этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT – анализа (таблица 3.3). Она заполняется, исходя из анализа таблицы 3.2.

Таблица 3.3 – SWOT – анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>C1. Экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>C2. Экологичность метода. При работе на установке все выделяемые вещества находятся, в пределах нормы, не происходит загрязнения окружающей среды.</p> <p>C3. Процесс десублимации UF6 оптимизирован, уменьшение</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Технология применима не для всех предприятий.</p> <p>Сл2. Отсутствие собственной сырьевой базы (гексафторид урана).</p>
--	---	---

	потери целевого продукта. С4. Отличная от конкурентов технология.	
Возможности: В1. Создание более оптимизированной технологии. В2. Появление дополнительного спроса на технологию.	В1С1С2С3С4, В2С1С2С3С4. Из данной комбинации видим, что вышеперечисленные сильные стороны благотворно влияют на возможность создания более оптимизированной технологии и появление дополнительного спроса на технологию.	В1Сл2Сл3, В2Сл1Сл2. Анализ показывает, что такие возможности как В1 и В2 положительно влияют на слабые стороны проекта, т.к новая технология будет иметь высокий спрос у других предприятий, также существенно улучшить сложное финансовое положение.

Продолжение таблицы 3.3

Угрозы: У1. Создание схожей технологии для горизонтальных емкостей. У2. Отсутствие спроса на новые технологии.	У1С1С2С3С4, У2С1С2С3С4. Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования	-
---	---	---

Таким образом выяснили, что сильные стороны проекта, такие как экономичность и энергоэффективность технологии, конкурентоспособность, экологичность и оптимизация процесса десублимации позволяет пересилить слабые стороны, такие как невозможность применить технологию для всех предприятий и отсутствие собственной сырьевой базы. Представленные возможности положительно влияют на слабые стороны, а угрозы не представляются существенными благодаря сильным сторонам проекта.

3.2 Планирование НИР

В настоящее время наука в значительной степени определяет темпы технического прогресса и роста народного благосостояния. Только рациональное использование выделяемых для науки средств, концентрация их на приоритетных направлениях, совершенствование координации деятельности научно-исследовательских учреждений, быстрое внедрение научных и исследовательских разработок и проектов может ускорит научно-технических

прогресс (НТП). Это обуславливает необходимость планирования и организации научно-исследовательских работ (НИР)

Однако важно не только разработать ту или иную научную тему, но и провести её анализ с точки зрения экономических требований, т.е. определить затраты на разработку, продолжительность работ, рассмотреть вопрос об экономической эффективности НИР.

Экономическая часть дипломной работы включает в себя рассмотрение следующих вопросов:

- 1) Планирование НИР.
- 2) Смета затрат.

3.2.1 Планирование этапов и работ по выполнению НИР

Работа по теме включает в себя следующие этапы:

- 1) Обзор литературы по теме.
- 2) Сбор и обработка расчетных данных.
- 3) Подготовительный этап
- 4) Проведение экспериментов.
- 5) Анализ результатов экспериментов.
- 5) Оформление отчёта.

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и студент.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Расчет параметров линейного графика требует определения продолжительности работ. При отсутствии нормативов времени на проведение отдельных видов работ используются вероятностные оценки. Порядок составления этапов и работ приведен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Перечень категорий, этапов, работ и распределение исполнителей

Категория	Этап	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка ТЗ на ВКР	1	Составление и утверждение технического задания	руководитель
Выбор направления исследования	2	Изучение проблемы и подбор литературы	студент
	3	Изучение литературы и выбор методов решения проблемы	студент
	4	Календарное планирование работ по теме	студент
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Экспериментальные исследования	руководитель, студент
	6	Анализ и обработка полученных результатов	руководитель, студент
	7	Расчет экспериментальных данных	студент
	8	Оценка эффективности полученных результатов	руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	9	Экономика, охрана труда и техника безопасности.	студент
	10	Подготовка к защите темы	студент

3.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР

Необходимо спланировать работу каждого участника эксперимента и сроки их проведения. Для оптимизации работ удобнее всего использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Для этого составляют перечень работ в той последовательности, в которой они

приведены в соответствующей таблице. Расчет параметров линейного графика требует определение продолжительности работ.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко–днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ $t_{ож}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (3.1)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.–дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.–дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.–дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (3.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.–дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

3.2.3 Разработка календарного плана работ

Показатель технической готовности темы характеризует отношение

продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 4 месяца, включая производственную практику, и дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$y_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

где y_i – удельное значение каждой работы, %;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

T_p – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Техническую готовность темы Γ_i , можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^i T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

где $\sum T_{pi}$ – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (3.5)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения 1 работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность одной работы в рабочих днях;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (3.6)$$

где $T_{кг}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вд}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пд}$ – количество праздничных дней в году.

$$k = \frac{365}{365-104-14} = 1,478. \quad (3.7)$$

Расчетная величина продолжительности работ T_k округляется до целых чисел. Расчетные данные сводятся в таблице 3.2, на основании которой строится календарный план–график.

На примере составления и утверждения технического задания рассмотрим методику расчета временных показателей:

$$t_{\min 1} = 2 \text{человеко–день, } t_{\max 1} = 3 \text{человека–дня;}$$

$$t_{\text{ож}1} = \frac{3 \cdot t_{\min 1} + 2 \cdot t_{\max 1}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 3}{5} = 2,4 \text{человека–дня;}$$

$$T_{p1} = 2,4 \text{ рабочих дней;}$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365-118-14} = 1,566;$$

$$T_{k1} = 2,4 \cdot 1,566 = 3,75 \text{ календарных дня.}$$

Аналогичным образом проводим расчеты для других этапов научного исследования и сводим результаты в табл. 3.2.

Календарный план–график в виде диаграммы Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится на основе данных из таблицы 3.5 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Работы на графике выделены различным цветом в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план–график в виде диаграммы Ганта приведен на таблице 3.6.



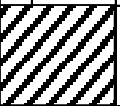


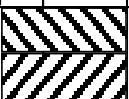




Таблица 3.5 – Временные показатели проведения НИР

Этап	t_{\min}	t_{\max}	$t_{\text{ож}}$	Исполнители	T_p , раб.дн.	T_k , кал.дн	U_i , %	Γ_i , %
1	2	3	2,4	научный руководитель	2,4	3,75	3,5	3,5


2	6	9	7,2	студент	7,2	11,27	10,5	14
3	7	10	8,2	студент	8,2	12,84	11,9	25,9
4	3	5	3,8	студент	3,8	5,95	5,5	31,4
5	12	15	13,2	научный руководитель, студент	6,6	10,33	9,6	41
6	14	18	15,6	научный руководитель, студент	7,8	12,21	11,4	52,4
7	6	9	7,2	студент	7,2	11,27	10,5	62,9
8	7	10	8,2	научный руководитель, студент	4,1	6,42	6	68,9
9	11	14	12,2	студент	12,2	19,105	17,8	86,7
10	8	11	9,2	студент	9,2	14,4	13,4	100
Итого			87,2		68,7	107,54		100

Таким образом, в ходе планирования научно-исследовательских работ определён перечень работ, выполняемый рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель и студент. Согласно составленному плану работ длительность трудовой занятости в рабочих днях сотрудников исследовательского проекта составила 108 день. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, построенный на основе диаграммы Ганта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это оформление пояснительной записки к ВКР.

Таблица 3.6 – Календарный план–график (диаграмма Ганта) проведения ВКР

Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ, неделя											
			февраль			март			апрель			май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. Составление и утверждение ТЗ	Н.р.	3,75												
2. Изучение проблемы, обзор литературы	С.	11,27												
3. Изучение литературы, выбор методов решения проблем	С.	12,84												
4. Календарное планирование работ по теме	С.	5,95												
5. Экспериментальные исследования	Н.р. + С.	10,33												
6. Анализ и обработка полученных результатов	Н.р. + С.	12,21												
7. Расчет экспериментальных данных	С.	11,27												
8. Оценка эффективности полученных результатов	Н.р. + С.	6,42												
9. Экономика, охрана труда и техника безопасности	С.	19,105												
10. Социальная ответственность	С.	14,4												

Научный руководитель – 

Студент – 

3.3 Определение плановой себестоимости проведения НИР

3.3.1 Состав затрат, включаемых в себестоимость НИР

Целью планирования себестоимости проведения НИР является экономически обоснованное определение величины затрат на ее выполнение. В плановую себестоимость НИР включаются все затраты, связанные с ее выполнением независимо от источника финансирования. Определение затрат на НИР производится путем калькуляции плановой себестоимости. Она является основным документом, на основании которого осуществляется планирование и учет затрат на выполнение НИР.

Сметно–плановая калькуляция составляется для определения затрат, необходимых для разработки научно–технической темы. Затраты подразделяются на прямые и накладные.

Прямые расходы прямо переносятся на себестоимость разработки. В состав прямых затрат входят:

1. Стоимость основных и вспомогательных материалов.
2. Заработная плата (ЗП) рабочих.
3. Отчисления на социальное страхование, в пенсионный фонд и другие внебюджетные фонды.
4. Затраты на электроэнергию.
5. Прочие прямые расходы.

Накладные расходы — это расходы, переносящиеся пропорционально какой-либо базе, обычно заработной плате.

Накладные расходы включают:

1. Расходы по содержанию зданий.
2. Расходы по содержанию эксплуатационного оборудования.
3. Административно – управленческие расходы.
4. Расходы на охрану труда.

5. Расходы на санитарно – бытовые нужды.

Величина прямых затрат определяется прямым счетом, это затраты, связанные непосредственно с выполнением конкретной НИР, остальные затраты рассчитываются косвенным способом, это затраты на содержание аппарата управления, общетехнических и общехозяйственных служб.

3.3.2 Формирование и расчёт затрат, включаемых в себестоимость

3.3.2.1 Материальные затраты

Этот пункт включает в себя стоимость всех материалов, необходимых для выполнения НИР.

К категории материалов относят:

- 1) сырьё, основные и вспомогательные материалы;
- 2) покупные полуфабрикаты и комплектующие изделия;
- 3) электроэнергия и вода на технологические цели.

Некоторые материалы: Персональный компьютер являются собственностью кафедры Технической физики, поэтому в расчет показателей затрат не берутся.

Эксперименты проводились 9 дней по 2 часа (18 часов), мощность установки 0.8 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (3.9)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (3,5 руб. за 1 кВт–ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{эл} = 3,5 \cdot 0,8 \cdot 18 = 50,4 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_m = C_{эл}, \quad (3.10)$$

$$C_m = 50,4 \text{ руб.}$$

3.3.2.2 Затраты на оплату труда работников

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (3.11)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (3.12)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно–техническим работником, раб.дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (3.13)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада дипломника выступает стипендия, которая составляет 2275 руб);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб.дн. $M=10,4$ месяца, 6 – дневная неделя);

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно–технического персонала (в рабочих днях).

Баланс рабочего времени представлен в таблице 3.7.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot k_p = 50000 \cdot 1,3 = 65000 \text{ руб}, \quad (3.14)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по квалификационной группе, руб. (для профессора $Z_{тс}$ составляет 50000руб);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3.

Таблица 3.7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
–выходные дни	52	104
–праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
–отпуск	48	24
–невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Зтс, Руб	Кр	Зм, Руб	Здн, руб.	Траб раб.дн.	Зосн, руб.
Руководитель	50000	1,3	65000	3266,3	32	104521,6
Студент	-	-	2275	114,3	100	11430

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (3.15)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{\text{доп}}=0,1$);

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 3.9 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 3.9 –Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Студент
Основная зарплата, руб	104521,6	11430
Дополнительная зарплата, руб	10452,16	-
Зарплата исполнителя, руб	104521,6	11430
Итого по статье $C_{\text{зн}}$, руб	115951,6	

3.3.2.3 Отчисления в государственные страховые фонды

Дипломная работа выполнялась с февраля 2020 года по май 2020 года. Для образовательных учреждений размер страховых взносов – 30,2%. Таким образом выплаты в страховые фонды составят:

$$C_{\text{стр}} = k_{\text{стр}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (3.16)$$

где $k_{\text{стр}}$ – коэффициент отчислений.

$$C_{\text{стр}} = 0,302 \cdot (104521,6 + 10452,16) = 34721,89 \text{ руб.}$$

3.3.2.4 Прочие прямые расходы

В прочие расходы могут быть включены: затраты на приобретение научно–технической литературы; расходы на пользование Интернетом, аренду спецоборудования, командировки, почтовые и телеграфные расходы.

Прочие расходы составляют 5% от единовременных затрат на реализацию проекта и составят:

$$C_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \cdot (C_{\text{м}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{стр}}), \quad (3.17)$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент прочих расходов.

$$C_{\text{пр}} = 0,05 \cdot (50,4 + 115951,6 + 34721,89) = 7536,195 \text{ руб.}$$

3.3.2.5 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных (общеуниверситетских) служб, которые в равной степени относятся ко всем выполняемым НИР. По этой статье учитываются оплата труда административно–управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25–35% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (3.18)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (104521,6 + 10452,16) = 34492,13 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИР, приведенная в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Калькуляции плановой себестоимости.

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
1. Материалы, руб	50,4
2. Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых созданием НИР, руб	104521,6
3. Выплаты в страховые фонды, руб	34721,89
4. Прочие прямые расходы, руб	7536,195
5. Накладные расходы, руб	34492,13
Итого себестоимость НИР, $C_{\text{нир}}$, руб	181322,2

Таким образом, проделав расчеты, получили себестоимость НИР 181322,2 руб. Бюджет НИР состоит из материальных затрат (50,4 рублей), оплату труда работников, непосредственно занятых созданием НИР (104521,6 рубль), отчислений во внебюджетные фонды (34721,89 рубль), прочих прямые расходы (7536,195 рублей) и накладных расходов (34492,13 рубля).

3.4 Эффективность НИР

Все научно-исследовательские работы должны проводиться с полным технико-экономическим обоснованием ожидаемой и фактической эффективности результатов разработки. В связи с многообразием форм воздействия результатов НИР на все стороны общественного развития, виды эффекта от выполняемых работ можно классифицировать грубо по двум признакам: по сфере проявления эффекта и характеру его воздействия на общественное развитие. По характеру воздействия на общественное развитие выделяется три основных эффекта; экономический, оборонный, социальный.

В связи с тем, что под эффектом НИР, в общем подразумевают полезный результат, отдача её выполнения и последующего за тем внедрения, существует система количественных и качественных характеристик оценки разных видов эффектов.

Социальный эффект можно рассматривать как совокупность его основных разновидностей.

- социально-политический,
- социально научный,
- социально-культурный.

Социально-научный эффект в росте числа открытий, изобретений, увеличение суммарного объема научно-технической информации, полученной в результате выполнения НИР. За последние годы появилось предложение не только определять по количественной характеристике социального эффекта, но и по системе количественных показателей его оценки.

Элементом количественной оценки социально–научного эффекта следует определение научно-технического эффекта НИР по методике. Сущность этой методики состоит в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент социально-научного эффекта НИР:

$$H_T = \sum_{i=1}^4 r_i k_i \quad (4.19)$$

Где r_i – весовой коэффициент i -го признака научно – технического эффекта;

k_i – количественная оценка i -го признака.

Количественная оценка уровня новизны определяется на основе значений баллов. Теоретический уровень полученных результатов НИР определяется на основе значений баллов, приведенных в Таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Весовые коэффициенты признаков научно-технического эффекта.

Признаки научно–технического эффекта	Примерные значения r_i
Уровень новизны	0,6
Теоретический уровень	0,4
Возможность реализации	0,2

Оценим по данной методике научно–технический эффект данной дипломной работы и сравним её по коэффициентам научно–технического эффекта с максимально и минимально возможным.

Таблица 3.12 – Баллы уровней новизны.

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	баллы
Принципиальное	По–новому или впервые объяснены известные факты, закономерности. Разработано существенное усовершенствование. Введены новые понятия, дополнения, уточнения ранее достигнутых результатов.	8–10

Продолжение таблицы 3.12

Новое	Разработано усовершенствование. Впервые найдена связь между известными фактами, объектами. Разработаны более простые способы для достижения прежних результатов.	5–7
Относительно новое	Результаты исследований систематизируются и обобщаются имеющиеся сведения. Определяют пути дальнейшего исследования. Проведена рациональная частичная модификация.	2–4
Традиционные	Работа выполнена по традиционной методике. Результат исследований носит информационный характер. Подтверждены или поставлены под сомнения известные представления, нуждающиеся в проверке.	1
Не обладающие новизной	Получен результат, который был ранее известен.	0

Таблица 3.13 – Баллы значимости теоретических уровней.

№	Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
1	Установление закона, разработка новой теории.	9–10
2	Глубокая разработка проблемы: многоэлементный анализ связей, взаимосвязей между фактами.	7–8
3	Разработка способов(алгоритм, программа мероприятий).	3–6
4	Элементарный анализ между факторами с наличием гипотезы, классификации, объясняющей версии.	0.6–2
5	Описание отдельных элементарных фактов, изложение опыта, наблюдение результатов измерений.	0–0.5

Таблица 3.14 – Вероятность реализации научных результатов (теоретических работ) по времени и масштабу реализации.

№	Время реализации	Баллы
1	В течение первых лет	5–10
2	От 5 до 10 лет	3–4
3	Более 10 лет	0–2

Таблица 3.15 – Масштабы реализации.

№	Масштабы реализации	Баллы
1	Одно или несколько предприятий	0–2
2	Отрасль(министерство)	3–4
3	Народное хозяйство	5–10

Настоящая дипломная работа оценивается следующим образом:

- балл уровня новизны – 8
- балл значимости теоретического уровня – 7
- балл по времени реализации – 10

– балл по масштабам реализации – 4

Коэффициент научно-технического эффекта дипломной работы составляет:

$$H_T = 0,6 \cdot 8 + 0,4 \cdot 7 + 0,2 \cdot 10 + 0,2 \cdot 4 = 10,4 \quad (3.20)$$

Максимальный возможный коэффициент:

$$H_{T_{\max}} = 14 \quad (3.21)$$

Минимально возможный коэффициент:

$$H_{T_{\min}} = 1 \quad (3.22)$$

Таким образом, провели оценку научно-технического эффекта НИР, коэффициент которого получился равным 10,4. При сравнении с максимально возможным коэффициентом можно увидеть, что работа выполнена на высоком уровне.

Вывод по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение:

1. SWOT-анализ проекта показал, что сильные стороны проекта, такие как экономичность и энергоэффективность технологии, конкурентоспособность, экологичность и оптимизация процесса десублимации, преобладают над слабыми, такими как невозможность применить технологию для всех предприятий и отсутствие собственной сырьевой базы. Представленные возможности положительно влияют на слабые стороны.

2. В ходе выполнения данной дипломной работы был составлен календарный план по НИР, время, необходимое для его выполнения 108 календарных дней.

3. Рассчитана смета затрат на НИР, общая сумма затрат на НИР равна 181322,2 руб.

4. Произвели оценку научно-технического эффекта НИР, которая получилась равной 10,4 из 14. При сравнении с максимальным коэффициентом, пришли к выводу, что работа выполнена на высоком уровне.

4 Охрана труда и техника безопасности

Введение

Для снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости повсеместно внедряется комплексная система управления охраной труда. Совместно с внедрением системы охраны труда должно проводиться непрерывное повышение качества и эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты от вредных и опасных факторов, с которыми сталкивается рабочий персонал в течение профессиональной деятельности.

Охрана труда – система обеспечения безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические и иные мероприятия.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого может привести к травме или другому резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего может привести к заболеванию или снижению трудоспособности [89].

Сложность обеспечения охраны труда сводится к использованию достижений многих областей человеческой деятельности, связанных с созданием безопасности труда. Так, при разработке требований производственной санитарии используются результаты ряда медико-биологических исследований.

Успешное решение задач по обеспечению безопасности труда во многом зависит от квалификации специалистов в этой области, от их умения оперативно принимать правильные решения в сложных условиях производства.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях

профилактики несчастных случаев и являются обязательными для исполнения рабочими, инженерно-техническим и руководящим составом.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рис. 4.1.

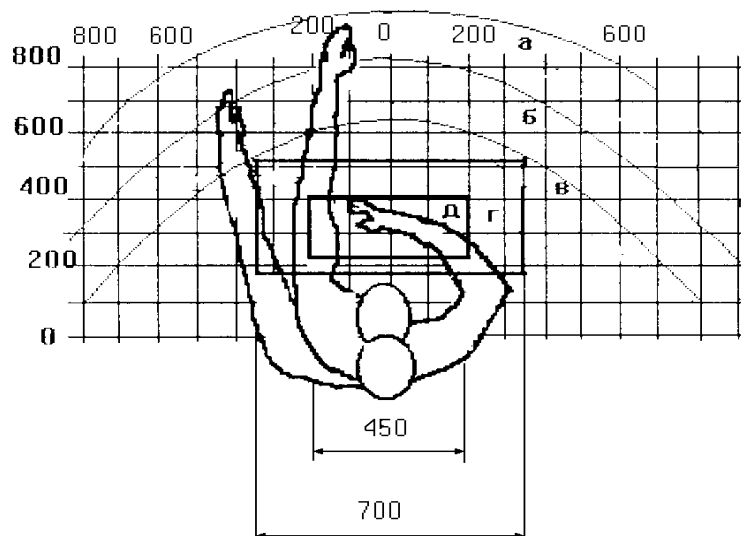


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

– дисплей размещается в зоне а (в центре);

– клавиатура — в зоне г/д;

– системный блок размещается в зоне б (слева);

– принтер находится в зоне а (справа);

документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони — в (слева)
— литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках
стола — литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие

требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 – 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500 – 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	<ul style="list-style-type: none"> отклонение параметров микроклимата; 	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03

	<ul style="list-style-type: none"> • шум и вибрация; • недостаточная освещенность рабочей зоны; • электромагнитное излучение; • статические и динамические нагрузки; <p>нервно-эмоциональные перегрузки.</p>		<p>Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.</p> <p>«Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»</p>
--	--	--	--

На работника лаборатории воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия опасных и вредных факторов

Основные параметры, характеризующие условия труда — это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [90] и

приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция [90].

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20 – 25 °С, зимой — 13 – 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания [90].

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие

на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ [90].

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более [90]:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц — 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц — 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц– 2 кГц — 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц — 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. Общее время труда за ПЭВМ не должно составлять более 6 часов, а сумма перерывов должна составлять не менее 70 минут для 8 часовой смены и 120 – для 12 часовой [29].

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха

длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ПЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Действие электрического тока на организм человека носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм человека, электрический ток производит термическое, электролитическое и биологическое действие.

Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов, нервов, мозга и других органов, и систем, что вызывает их серьезные функциональные расстройства. Электролитическое действие тока проявляется в разложении крови и других жидкостей в организме, вызывая тем самым значительные нарушения их физико-химических составов, а также ткани в целом. Биологическое действие тока выражается главным образом в нарушении биоэлектрических процессов, свойственных живой материи, с которыми связана ее жизнеспособность.

Многообразие действий электрического тока на живой организм можно условно свести к двум основным видам поражений: электрическим травмам, когда возникает местное повреждение организма, и электрическим ударам,

когда ток вызывает раздражение и возбуждение тканей, сопровождающиеся непроизвольными судорожными сокращениями мышц.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

—отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

—вывешивание плакатов, указывающих место работы;

—заземление корпусов всех установок через нулевой провод;

—покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

—недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих частей) [31].

4.3. Экологическая безопасность

В настоящий момент наиболее строгим из существующих мировых стандартов экологичности для компьютерной техники является стандарт ТСО99. По сравнению с предыдущими он содержит дополнительные ограничения по части экологии, эргономичности, энергопотребления и эмиссии устройств. Более важные ярлыки, такие как «Голубой ангел», выдаваемый Германской сертификационной организацией как знак соответствия экологическим стандартам, являются большой редкостью в сфере электроники.

Организация по защите окружающей среды Greenpeace с 2006 года оценивает производителей электроники по количеству тяжелых металлов и ядовитых веществ, например ингибиторов горения, используемых ими при производстве (ингибитор - вещество, присутствие которого в небольших количествах приводит к предотвращению или замедлению процессов горения или коррозии; ингибиторы снижают скорость химических реакций или подавляют их). Однако даже оценки такой организации, как Greenpeace, не

могут претендовать на объективность.

Сегодня отдельные комплектующие закупаются на различных предприятиях по всему миру, после чего осуществляется сборка устройств. Поэтому зачастую даже сами компании не могут знать, какие вредные вещества попадают в атмосферу при изготовлении их продукции и какие именно металлы или токсины в ней содержатся.

ЖК-экраны - один из источников парниковых газов, которые намного вреднее диоксида углерода. Жидкокристаллические мониторы быстро обрели популярность, придя на смену громоздким ЭЛТ-моделям. И это неудивительно, ведь они обладают тонкими корпусами и потребляют значительно меньше электроэнергии. По другим аспектам экологической безопасности дисплеи на основе жидких кристаллов также считались прорывом, потому что в них не использовался газ, содержащий свинец. Довольно долго никто не обращал внимания на применяемый для чистки ЖК-панелей трехфтористый азот (NF_3), и только в середине 2008 года учеными было доказано наличие данного химического вещества в атмосфере. Открытие было впечатляющим: по сравнению с диоксидом углерода (CO_2) NF_3 является в 17 000 раз более активным парниковым газом, а его атмосферное время полураспада может составлять от 550 до 740 световых лет (у CO_2 - от 30 до 40 лет) [34]. Закона, который ограничивал бы уровень выброса NF_3 , пока не существует.

Выявление энергозатрат является таким же проблематичным процессом, как и определение количества материалов, пригодных для вторичной переработки, и тяжелых металлов, содержащихся в устройствах. Удивительный результат был получен организацией Greenpeace в ходе сравнительного анализа нескольких моделей идентичных ноутбуков из различных стран. В тачпаде Dell Vostro V13, доступного на китайском рынке, были обнаружены следы брома. В модели из Германии это вещество тоже присутствовало, только не в тачпаде, а в кнопках. В ноутбуке, купленном в США, бром был найден в блоке питания. Схожая картина наблюдается и у других производителей: при исследовании

продукции компании Apple эксперты обнаружили, что в кабеле ноутбука MacBook Pro 13 из США и Нидерландов содержится в три раза больше брома, чем в устройствах из Филиппин и России. При анализе другого кабеля следы брома обнаружили уже в устройствах из России и Нидерландов, а в модели из США их не было [34]. Таким образом, надежным показателем экологичности остается только уровень энергопотребления - среди субноутбуков первенство принадлежит лишь нескольким моделям, а остальные резко отличаются от лидеров по своим характеристикам.

Добывающие производства разрушают поверхность Земли и зачастую загрязняют окружающий воздух и воду. Добыча редкоземельных минералов невозможна или нерентабельна без использования процессов, которые наносят серьезный вред окружающей среде.

Поливинилхлорид, обозначаемый обычно аббревиатурой ПВХ, — это разновидность пластика, применяемая в самых разных целях. Из него сделана внешняя оболочка кабелей, которыми соединяются устройства, он окружает электрический провод портативного компьютера. ПВХ присутствует в музыкальной коллекции любителей виниловых пластинок. Из него делают трубы и одежду. Это дешевый, прочный и весьма распространенный материал.

Вместе с тем, по словам IT-аналитика «Гринпис» Кейси Харрелла, «ПВХ - худший из пластиков». Он является причиной возникновения гормонального дисбаланса, проблем в репродуктивной сфере и различных форм рака [34].

Поливинилхлорид практически невозможно правильно утилизировать. В результате старый материал оказывается обычно на свалке с отходами или, того хуже, сжигается с целью извлечения медных жил и других ценных компонентов. При его сгорании образуется крайне вредный канцерогенный диоксин. Свалки и химические захоронения загрязняют источники воды. Единственный способ правильно утилизировать ПВХ заключается в том, чтобы отправить его в центр опасных отходов. Радует то, что некоторые технические компании (например, Apple) уже прекратили использовать поливинилхлорид в

производстве.

Организация «Гринпис» внимательно следит за тем, как крупные компании относятся к защите окружающей среды, и регулярно публикует отчет Greenpeace Guide to Greener Electronics, в котором производителям (HP, Sony, Toshiba и др.) присваиваются рейтинги в трех основных категориях: рациональность операций, энергия и климат, экологически чистые продукты.

Можно сделать вывод, что остается лишь надеяться, что настанет время, когда технологии будут помогать человеку, не причиняя необратимый ущерб здоровью окружающей среды.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация — это обстановка на определённой территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [33].

Согласно [32], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция

кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации (рис. 4.2.);

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий,

при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр и испытание оборудования.



Рисунок – 4.2 План эвакуации при пожаре и других ЧС

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Выводы по главе «Социальная ответственность»

1. Рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, приведены нормативные документы и рассмотрены организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Выяснили, что основными вредными факторами являются: отклонение параметров микроклимата, шум и вибрация, недостаточная освещенность рабочей зоны, электромагнитное излучение, статические и динамические нагрузки, нервно-эмоциональные перегрузки. Основным опасным фактором является электрический ток. Также рассмотрели мероприятия по снижению воздействия вредных и опасных факторов.
3. Рассмотрели вопросы воздействия компьютерной техники на экологию и аспекты утилизации отработанной компьютерной техники.
4. Проанализирована чрезвычайная ситуация – возникновение пожара на рабочем месте и меры предотвращения и порядок действий при возникновении данной ЧС.

ВЫВОДЫ

1. Проведена проверка на адекватность газодинамической составляющей разработанной двумерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF_6 на задаче естественно-конвективного течения газообразного UF_6 в вертикальной цилиндрической емкости без оребрения высотой 2 м, радиусом 0,5 м, с толщиной стенки $2,0 \cdot 10^{-2}$ м, изготовленной из стали марки 16ГС при наличии источника тепловыделения на ее нижней стенке.

2. Результаты расчетов показали хорошую сходимость с известными литературными данными. Они подтверждают адекватность созданной математической модели, описывающей свободно-конвективное течение газообразного гексафторида урана, происходящее при его десублимации в вертикальной цилиндрической емкости без оребрения.

3. Показано, что с течением времени происходит повышение температуры газа во всей расчетной области, а в момент времени $\tau=100$ с в зоне $0,2 < R < 0,44$ м происходит локальное понижение температуры, обусловленное наличием нисходящего газового потока.

4. Установлено, что постепенное выравнивание профиля вертикальной компоненты скорости с уменьшением интенсивности нисходящего потока объясняется уменьшением скорости конвекции вместе с падением градиента температуры со временем τ .

5. Показано, что увеличение числа Нуссельта Nu_{avg} происходит вследствие увеличения градиента температур и толщины стенки емкости. Снижение средней температуры в области решения и ослабление интенсивности возникающего конвективного течения происходит из-за снижения температуры источника.

Полученные результаты могут использоваться для верификации двухмерной математической модели, которая может быть использована для расчета параметров десублимации гексафторида урана в вертикальных

погружных емкостях без оребрения, с горизонтальным оребрением в АО «ПО ЭХЗ».

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Задача Стефана / А.М. Мейрманов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 240 с.
2. Финько С.Ф. Моделирование теплофизических процессов инееобразования на низкотемпературных поверхностях энергетических установок: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14, 05. 14.04 / Финько Сергей Филиппович. – Воронеж, 2002. – 123 с.
3. Статистическая физика и термодинамика / Ф.М. Куни. – М.: Наука, 1981. – 352 с.
4. Введение в кинетическую теорию газов / В.П. Силкин. – М.: Наука, 1971. – 332 с.
5. Математическая теория процессов переноса в газах / Дж. Ферцигер, Г. Капер. – М.: Мир, 1976. – 556 с.
6. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов / К.П. Гуров. – М.: Наука, 1978. – 128 с.
7. Неравновесная термодинамика / С. де Грот, П. Мазур. – М.: Мир, 1964. – 456 с.
8. Неравновесная термодинамика / И. Дьярмати. – М.: Мир, 1976. – 404 с.
9. Введение в термодинамику / И. Пригожин. – М.: ИЛ, 1960. – 160 с.
10. Горелик А.Г. Десублимация в химической промышленности / А.Г. Горелик, А.В. Амитин. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
11. Соловьев Г.С. Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана / Г.С. Соловьев, А.В. Сапрыгин, В.М. Голик и др. // Всероссийской научно–практической конференции “Фторидные технологии”: тез. докладов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 68.
12. Теоретические основы образования тумана в химических производствах / А.Г. Амелин. – М.: Государственное научно–техническое издательство химической литературы, 1951. – 170 с.

13. Теоретические основы образования тумана при образовании пара / А.Г. Амелин. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – М.: Химия, 1972. – 304 с.
14. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
15. Математическое моделирование процесса десублимации UF₆ / А.А. Орлов, С.М. Кошелев, В.И. Вандышев и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 89–92.
16. Химия урана: уран как элемент, его бинарные соединения, гидраты окислов и оксигалогениды / Дж. Кац, Е. Рабинович. – пер. с англ. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. – 492 с.
17. Гексафториды актиноидов / В.А. Зуев, В.Т. Орехов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
18. Определение коэффициента теплопроводности твердой фазы гексафторида урана / В.В. Раев, А.В. Сапрыгин, А.П. Цедилкин и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 125–130.
19. Экспериментальное исследование процесса десублимации от длительности цикла захлаживания / А.В. Вильнина, В.Ф. Дядик, С.А. Байдали и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 91–93.
20. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана / А.В. Вильнина, С.Н. Ливенцов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 133–136.
21. Исследование режимов работы десублиматоров / А.С. Блинникова, А.В. Вильнина, А.С. Байдали и др. // Сборник трудов юбилейной научно-технической конференции “Автоматизация и управление в промышленности, науке и образовании”: тез. докладов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 41–46.

22. Анализ влияния цикла захолаживания на основные показатели эффективности работы десублиматоров / А.С. Байдали, А.В. Вильнина, В.Ф. Дядик и др. // Всероссийской научно–практической конференции “Фторидные технологии”: тез. докладов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 70.
23. Вильнина А.В., Ливенцов С.Н., Нагайцева А.В. Разработка адаптивного алгоритма управления узлом десублимации. //Современные техника и технологии: Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 26-30 марта 2007. - Томск: ТПУ, 2007. - с. 299-301.
24. Вильнина А.В. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана / А.В. Вильнина, С.В. Ливенцов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5 – С. 133 – 136.
25. Губанов С.М. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3. – № 4. – С. 383 – 388.
26. Весенин И.М. Математическая модель и результаты численных расчетов перелива UF_6 в присутствии микроколичеств легких примесей / И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, А.А. Шахтин и др. // Известия Томского государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 53 – 59.
27. Губанов С.М. Математическая модель и результаты численных расчетов охлаждения осадительных емкостей при десублимации потока UF_6 и легких примесей / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 56 – 65.
28. Цимбалюк А.Ф., Орлов А.А., Малюгин Р.В., Гостица И.В. Влияние геометрии емкостей на динамику их заполнения десублимированным UF_6 / VII Межд. школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 17-18 мая 2017. –Томск: ТПУ, 2017 – С. 110.

- 29.Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.
- 30.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
- 31.ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
- 32.Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность
- 33.Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»
- 34.Компьютер – враг окружающей среды. Режим доступа <http://www.chip.ua/stati/kompyuter-2014-vrag-okruzhayuschei-sredy/>, свободный. - Загл. с экрана.